

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

*Журнал заснований у 1918 році*

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 37 (76) № 1 2026**

**Частина 1**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2026

## Головний редактор:

**Кисельов Володимир Борисович** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

## Члени редакційної колегії:

**Медведєв Микола Георгійович** (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Бронін Сергій Вадимович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**Домніч Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Дехтяр Анатолій Соломонович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

**Дичко Аліна Олегівна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Дубко Валерій Олексійович** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій та дизайну;

**Лисенко Олександр Іванович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Огородник Станіслав Станіславович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Сегай Олександр Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Чумаченко Сергій Миколайович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

**Цомко Олена** – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet  
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського  
(протокол № 9 від 6 квітня 2026 року).**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»  
zareєстровано відповідно до Рішення Національної ради України  
з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-04000.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського  
(просп. Берестейський, 10, м. Київ, 01135, e-mail: crimea.tnu@gmail.com, тел.: +38 (044) 529-05-16).

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька,  
французька, словацька, румунська, італійська.

Періодичність: 6 разів на рік.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук  
(спеціальності: G1 Хімічні технології та інженерія; G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією); G5 Електроніка,  
електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України  
від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), F2 Інженерія програмного забезпечення; F6 Інформаційні системи і технології;  
F7 Комп'ютерна інженерія; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка;  
D3 Менеджмент; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J5 Морський та внутрішній водний транспорт;  
J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт  
відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International  
(Республіка Польща)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

**ISSN 2663-5941 (Print)**

**ISSN 2663-595X (Online)**

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2026

## ЗМІСТ

### МАШИНОЗНАВСТВО

Омелич М.Ф., Васильєв Г.С.

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТОТНОЇ МОДУЛЯЦІЇ УЛЬТРАЗВУКУ  
ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ВІД КАРБОНАТНИХ ОСАДІВ.....1

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Кошель О.С., Залюбовський М.Г., Кошель С.О., Кошель Г.В.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ ЄМНОСТІ НА РУХ МАСИВУ  
ДЕТАЛЕЙ У МАШИНІ ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ.....7

### КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

Шпілевая Т.М.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ І ЕКОЛОГІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ  
ДВОПАЛИВНИХ ДВИГУНІВ У СУЧАСНОМУ ФЛОТІ.....16

### ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Троценко Є.О., Нестерко А.Б., Проценко О.Р., Перетятко Ю.В.

ВИКЛИКИ ТА ПІДХОДИ ДО ДІАГНОСТИКИ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ІЗОЛЯЦІЇ СИСТЕМ  
ВИСОКОЇ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....22

### ПРИЛАДИ

Скакун О.В.

ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ  
В ТРАНСПОРТНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ ТА ШУМОВИХ ПАРАМЕТРІВ У МЕГАПОЛІСАХ  
ТА ПРОМИСЛОВИХ ЦЕНТРАХ.....30

### РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Бараннік В.В., Прокопенко Р.О.

МЕТОД СТЕГАНОГРАФІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ПОЗИЦІЙНОМУ ПРОСТОРІ ..... 37

Беляков Р.О., Чурілов І.О.

МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ МАРШРУТИЗАЦІЄЮ  
НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ КЛАСУ MANET.....42

Бойко Ю.М., Пятін І.С., Єрмоєнко О.І.

МЕТОДИКА ВИСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ АБОНЕНТСЬКОГО  
ДОСТУПУ WI-FI 6/6E НА ОСНОВІ ОЦІНЮВАННЯ ЧАСУ ПРИБУТТЯ СИГНАЛІВ..... 49

Воловик А.Ю., Ніколенко М.С.

ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ У ПРИСУТНОСТІ НЕСПРАВНОСТЕЙ  
КАНАЛУ СПОСТЕРЕЖЕННЯ.....62

Воронець О.М., Пустовойтов П.Є.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОЇ ЕНЕРГІЇ ВУЗЛІВ З УРАХУВАННЯМ  
ТОПОЛОГІЇ ТА НАВАНТАЖЕННЯ В БЕЗДРОТОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ.....69

Гайдар Ю.Б.

МЕТОД ПРИСКОРЕНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ MESH-МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11BE  
З АДАПТИВНИМ ВИБОРОМ МАГІСТРАЛЬНОГО КАНАЛУ.....77

Галицький І.І., Живков О.П.

МІКРОХВИЛЬОВІ СЕНСОРИ НА БАЗІ КОМІРОК МЕТАМАТЕРІАЛІВ.....84

Гредасов Д.О., Яковенко І.В.

БАГАТОРІВНЕВА КЛАСТЕРНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ  
У РОСВИХ MESH-МЕРЕЖАХ ДРОНІВ.....100

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Коробейник С.М., Касілов О.В.</b><br>МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО РОЗПОДІЛУ ДОВЖИН ХВИЛЬ<br>У WDM-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ З НЕРІВНОМІРНИМ ТРАФІКОМ.....                                  | 110 |
| <b>Майдан О.І., Бреславець В.С.</b><br>КОГНІТИВНА МОДЕЛЬ ВИБОРУ ЧАСТОТ ДЛЯ ГЛУШІННЯ КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ<br>БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....                              | 117 |
| <b>Приймак С.О., Кравчук С.О.</b><br>ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИСОКОДОСТУПНОЇ VOIP СИСТЕМИ.....                                                                                | 126 |
| <b>Семенова О.О., Войцеховська О.О., Джус А.В., Кузняк В.П.</b><br>РОЗРОБЛЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ<br>ІНДЕКСУ ДОВІРИ В ІНТЕРНЕТІ РЕЧЕЙ..... | 148 |
| <b>Судаков Є.В., Сокол Г.В.</b><br>СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТІ МАС-ПРОТОКОЛІВ У МЕРЕЖАХ З<br>ТЕХНОЛОГІЄЮ МІМО.....                                                   | 156 |
| <b>Чмельов В.О., Олійник М.В.</b><br>ОСОБЛИВОСТІ ПРОСТОРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ В ВІРТУАЛЬНІЙ ФАР МІМО<br>З ВРАХУВАННЯМ БЛОЧНОЇ СТРУКТУРИ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ МАТРИЦІ.....      | 164 |
| <b>Шиман М.В., Савченко М.В.</b><br>УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ЧЕРГУВАННЯ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ<br>З РІЗНОРІДНИМ ТРАФІКОМ.....                                             | 171 |

## ЕНЕРГЕТИКА

|                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Баранюк О.В., Рачинський А.Ю., Сидоренко Ю.В., Пікенін О.О.</b><br>CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЕПЛОВІ<br>Й ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ КОТЛА Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50).....                                       | 178 |
| <b>Бошкова І.І., Волгушева Н.В., Мукмінов І.І., Писаревський І.О., Гречановський А.П.</b><br>ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОТИ НИЗЬКОГО<br>ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ДЛЯ ТЕПЛИЦЬ.....                                      | 186 |
| <b>Брунеткін О.І., Музика Д.О., Тафій В.В.</b><br>ІМІТАЦІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗИФІКАЦІЇ ОРГАНІЧНОЇ СИРОВИНИ.....                                                                                                                   | 192 |
| <b>Воїнов О.П., Елькін Ю.Г.</b><br>ПРО ВПЛИВ ПРОЦЕСУ ЗОВНІШНЬОЇ ЕРОЗІЇ НА РЕСУРС ПАРОВИХ КОТЛІВ<br>З КИПЛЯЧИМ ШАРОМ.....                                                                                                               | 202 |
| <b>Волянська Я.Б., Волянський С.М., Волянський Ю.С., Ященко В.С., Мицик А.І.</b><br>ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ<br>З УРАХУВАННЯМ СЕЗОННИХ ТА ДОБОВИХ КОЛИВАНЬ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ<br>ТА НАВАНТАЖЕННЯ..... | 210 |
| <b>Дорошенко В.В.</b><br>ОТРИМАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В НАФТОВІЙ СВЕРДЛОВИНІ ПРОВЕДЕННЯМ<br>ЕКЗОТЕРМІЧНОЇ ХІМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ .....                                                                                                         | 216 |
| <b>Скалозубов В.І., Кацарський Ю.С., Мазур Є.В., Вербило І.М., Дербеньов Г.С.</b><br>КВАЛІФІКАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ВИПРОБУВАНЬ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ПРИ ЗБІЛЬШЕННІ<br>ТРИВАЛОСТІ ПАЛИВНИХ КАМПАНІЙ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК.....                     | 223 |
| <b>Усенко А.Ю., Форись С.М., Біляєва В.В.</b><br>БІОМЕТАН У КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ АВТОНОМНОГО<br>ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ АГРОПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ.....                                                                                | 229 |

## ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

|                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Шокота М.Ю., Кравченко О.В., Гуляєв В.М., Коваленко А.Л.</b><br>ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СИНТЕЗУ НАНОРОЗМІРНОГО<br>МАГНІЙ ГІДРОКСИДУ З МОДИФІКОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ..... | 239 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|



|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Бровін О.Ю., Коваленко Ю.І., Лещенко С.А., Дерібо С.Г.</b><br>ВПЛИВ ІОНІВ НІТРАТУ НА АНОДНУ ПОВЕДІНКУ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ.....                                                                      | 247 |
| <b>Володимиров В.В.</b><br>НАНОДОБАВКИ У КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ, ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В<br>РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЯХ, ВПЛИВ НА РЕОЛОГІЮ, МІКРОСТРУКТУРУ<br>ТА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОННИХ З'ЄДНАНЬ.....        | 254 |
| <b>Воробйова В.І., Позняк К.О., Скиба М.І.</b><br>ДОБІР СКЛАДОВИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГІДРОФОБНИХ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ<br>ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ (V ТИПУ) НА ОСНОВІ КВАНТОВО-ХІМІЧНОГО<br>МОДЕЛЮВАННЯ..... | 263 |
| <b>Дундуков П.О., Ущатовський Д.Ю.</b><br>ЛОКАЛЬНЕ ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ОСАДЖЕННЯ МІДНИХ МІКРОРОЗМІРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ<br>СТРУМОПРОВІДНОГО РИСУНКУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ.....                                         | 269 |
| <b>Єфімова В.Г., Пилипенко Т.М., Семенець Ю.В.</b><br>ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМЕТИЧНИХ ЕМУЛЬСІЙ,<br>ЩО СТАБІЛІЗОВАНІ СУМІШШЮ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН.....                   | 276 |
| <b>Золотарьова О.В.</b><br>ДОСЛІДЖЕННЯ ВИРОБНИЦТВА СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ З РОЗРОБКОЮ СТАДІЇ<br>ВИПАЛУ СУЛЬФУРВМІСНОЇ СИРОВИНИ.....                                                                      | 282 |
| <b>Мітіна Н.Б., Мініна Ю.О.</b><br>ОЦІНКА ДЕСТРУКЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ПОЛІПРОПІЛЕНОВИХ МЕДИЧНИХ ВІДХОДАХ<br>ЗА УМОВ БІОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ.....                                                            | 287 |
| <b>Пономарьов М.Є.</b><br>НОВИЙ МЕТОД КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ВКЛАДУ ПАРАМЕТРІВ РОЗЧИННИКА У ВПЛИВ<br>НА ШВИДКІСТЬ РЕАКЦІЙ МОНОМОЛЕКУЛЯРНОГО ГЕТЕРОЛІЗУ.....                                               | 295 |
| <b>Солдатенков В.Ю., Мельник Л.І.</b><br>СУЧАСНІ СТРАТЕГІЇ СТВОРЕННЯ РЕСУРСОЕФЕКТИВНИХ БЕЗФТОРНИХ<br>ЕКОЛОГІЧНИХ ГІДРОФОБНИХ ПОКРИТТІВ.....                                                          | 301 |

## ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Данилюк І.П., Струтинська Л.Т.</b><br>ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ТА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ<br>БЕЗГЛЮТЕНОВИХ БУЛОЧОК ДЛЯ ГАМБУРГЕРІВ НА ОСНОВІ<br>АЛЬТЕРНАТИВНОЇ СИРОВИНИ..... | 313 |
| <b>Kovach O.I.</b><br>WORLD PRODUCTION OF PETILLANT NATUREL SPARKLING WINES, TECHNOLOGIES<br>AND TRENDS.....                                                                          | 322 |

## ТРАНСПОРТ

|                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Волобуєва Т.В., Кувшинов А.О., Мінаков В.М., Степанов О.В.</b><br>КОНЦЕПЦІЯ РОЗВИТКУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ<br>ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ІНТЕГРАЦІЇ.....                                                                 | 328 |
| <b>Дощенко Г.Г., Наговський Д.А.</b><br>МЕТОДОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЗА ПОКАЗНИКАМИ<br>ПАРАМЕТРИЧНИХ ВІДМОВ.....                                                                                                 | 334 |
| <b>Іванченко Д.А., Турпак С.М., Острогляд О.О., Мішнев А.С., Складенко Ю.О.</b><br>СТРАТЕГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ШВИДКОПСУВНИХ<br>ВАНТАЖІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ<br>У ПЕРІОД ВОЄННИХ ВИКЛИКІВ..... | 344 |
| <b>Кисельов В.Б., Назарова А.П.</b><br>ПОБУДОВА РАЦІОНАЛЬНИХ МАРШРУТІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НЕГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ<br>МЕРЕЖЕЮ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ<br>ДЕРЖАВНОГО ЗНАЧЕННЯ.....                                           | 350 |

|                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Літвяк В.І.</b><br>КЛАСИФІКАЦІЯ ФАКТОРІВ ТАРИФОУТВОРЕННЯ ПРИ ДОСТАВЦІ КОНТЕЙНЕРІВ<br>ТРАНСКАСПІЙСЬКИМ МІЖНАРОДНИМ ТРАНСПОРТНИМ МАРШРУТОМ.....                                                   | 359 |
| <b>Миронюк І.І., Васілова Г.С., Горецький О.А., Юрченко Д.О.</b><br>ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ТА ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ У ХОЛОДНИХ<br>ЛАНЦЮГАХ ЕКСПОРТУ ШВИДКОПСУВНОЇ ПРОДУКЦІЇ УКРАЇНИ ДО ЄС.....  | 366 |
| <b>Pavlova N.L.</b><br>INTERACTION MECHANISM OF TRANSPORT BUSINESS ENTITIES IN THE ORGANIZATION<br>OF CARGO DELIVERY.....                                                                          | 373 |
| <b>Сільванська Г.М.</b><br>ГЛОБАЛЬНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СВІТОВОГО РИНКУ ЯХТИНГУ – СЦЕНАРНИЙ<br>ТА КЛАСТЕРНИЙ ПІДХІД.....                                                                           | 380 |
| <b>Фомін О.В., Хара М.В., Маслак Г.В., Сущенко Р.В., Каплуновська А.М.</b><br>ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ У АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИПРОБУВАНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО<br>СТАНУ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ..... | 396 |
| <b>Черненко П.В., Ніконенко А.М., Парій С.Г.</b><br>СУЧАСНІ РУХОМІ РЕМОНТНІ МАЙСТЕРНІ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ –<br>КЛЮЧ ДО ПЕРЕМОГИ У ВІЙНІ.....                                                 | 402 |
| <b>Шпак Н.Г., Літачевський В.В.</b><br>АНАЛІЗ РІВНЯ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКОГО СУПРОВОДУ<br>МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖОПОТОКІВ.....                                                               | 409 |
| <b>БУДІВНИЦТВО</b>                                                                                                                                                                                 |     |
| <b>Гусєв Р.О., Маліков С.Д.</b><br>ПРОГНОЗУВАННЯ РУЙНУВАННЯ БЕТОННИХ ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ДІЄЮ<br>ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ОСНОВІ БЕЗРОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ.....                                 | 415 |
| <b>ГЕОДЕЗІЯ</b>                                                                                                                                                                                    |     |
| <b>Пілічева М.О.</b><br>УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ В ЗЕМЛЕУСТРОЇ: СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ.....                                                                                                     | 425 |
| <b>ЕЛЕКТРОНІКА</b>                                                                                                                                                                                 |     |
| <b>Баріло Н.Г., Брич М.В., Пришляк С.О., Брич П.В., Акоюн В.Г., Марків Д.В.</b><br>МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ФОТОСЕНСОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ<br>МУЛЬТИПЛІКАТИВНО-ІНТЕГРАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ.....         | 431 |
| ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....                                                                                                                                                                         | 439 |

# CONTENTS

## MACHINE SCIENCE

**Omelych M.F., Vasyliiev G.S.**

DETERMINATION OF THE EFFECTIVENESS OF FREQUENCY MODULATION  
OF ULTRASOUND FOR CLEANING STEEL SURFACES FROM CARBONATE DEPOSITS.....1

## INDUSTRIAL ENGINEERING

**Koshel O.S., Zalyubovskiy M.G., Koshel S.O., Koshel H.V.**

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CONTAINER LENGTH ON THE MOVEMENT  
OF PARTS IN A MACHINE FOR PROCESSING USING AN EXPERIMENT.....7

## SHIPBUILDING

**Шпілевая Т.М.**

ENERGY EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL FEASIBILITY  
OF USING DUAL-FUEL ENGINES IN THE MODERN FLEET.....16

## ELECTRICAL ENGINEERING

**Trotsenko Ye.O., Nesterko A.B., Protsenko O.R., Peretyatko Yu.V.**

CHALLENGES AND APPROACHES TO DIAGNOSTICS OF PARTIAL DISCHARGES  
IN INSULATION OF HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT SYSTEMS.....22

## EQUIPMENT

**Skakun O.V.**

ENVIRONMENTAL CONTROL AND ENVIRONMENTAL MONITORING  
OF HARMFUL EMISSIONS IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE AND NOISE PARAMETERS  
IN MEGACITIES AND INDUSTRIAL CENTERS.....30

## RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Barannik V.V., Prokopenko R.O.**

THE METHOD OF STEGANOGRAPHIC TRANSFORMATIONS IN POSITIONAL SPACE.....37

**Bieliakov R.O., Churilov I.O.**

INTELLIGENT ROUTING CONTROL MODEL FOR GROUND–AIR MANET-CLASS  
COMMUNICATION NETWORKS.....42

**Boiko J.M., Pyatin I.S., Eromenko O.I.**

A HIGH-ACCURACY POSITIONING METHODOLOGY FOR WI-FI 6/6E ACCESS NETWORKS  
BASED ON TIME-OF-ARRIVAL ESTIMATION.....49

**Volovyk A.Yu., Nikolenko M.S.**

ESTIMATING DYNAMIC SYSTEM STATE IN THE PRESENCE OF OBSERVATION  
CHANNEL FAULTS.....62

**Voronets O.M., Pustovoitov P.Ye.**

MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING RESIDUAL ENERGY OF NODES TAKING  
INTO ACCOUNT TOPOLOGY AND LOAD IN A WIRELESS SENSOR NETWORK.....69

**Haidar Yu.B.**

METHOD FOR ACCELERATED ORGANIZATION OF IEEE 802.11BE MESH NETWORKS  
WITH ADAPTIVE BACKHAUL CHANNEL SELECTION.....77

**Halytskyi I.I., Zhivkov O.P.**

MICROWAVE SENSORS BASED ON METAMATERIAL CELLS.....84

**Gredasov D.A., Yakovenko I.V.**

A MULTILEVEL CLUSTER MODEL FOR ENERGY CONSERVATION IN SWARM  
MESH DRONE NETWORKS.....100

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Korobeinyk S.M., Kasilov O.V.</b><br>MODEL OF DYNAMIC WAVELENGTH DISTRIBUTION<br>IN WDM OPTICAL NETWORKS WITH UNEVEN TRAFFIC.....                                                      | 110 |
| <b>Maidan O.I., Breslavets V.S.</b><br>COGNITIVE FREQUENCY SELECTION MODEL FOR JAMMING UNMANNED AIRCRAFT<br>CONTROL CHANNELS.....                                                         | 117 |
| <b>Priymak S.O., Kravchuk S.O.</b><br>DEPLOYMENT OF HIGHLY AVAILABLE VOIP SYSTEM.....                                                                                                     | 126 |
| <b>Semenova O.O., Voitsekhovska O.O., Dzhus A.V., Kuzniak V.P.</b><br>DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF A FUZZY CONTROLLER FOR ESTIMATING<br>THE TRUST INDEX IN THE INTERNET OF THINGS..... | 148 |
| <b>Sudakov Ye.V., Sokol H.V.</b><br>STOCHASTIC MODEL OF MAS PROTOCOLS PERFORMANCE IN NETWORKS<br>WITH MIMO TECHNOLOGY.....                                                                | 156 |
| <b>Chmelov V.O., Oliinyk M.V.</b><br>FEATURES OF SPATIAL SIGNAL PROCESSING IN A VIRTUAL MIMO PHASED ARRAY<br>WITH CONSIDERATION OF THE BLOCK STRUCTURE OF THE COVARIANCE MATRIX.....      | 164 |
| <b>Shyman M.V., Savchenko M.V.</b><br>GENERALIZED QUEUEING MODEL FOR TELECOMMUNICATION SYSTEMS<br>WITH DIVERSE TRAFFIC.....                                                               | 171 |

## POWER ENGINEERING

|                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Baranyuk O.V., Rachynskiy A.Yu., Sydorenko Iu.V., Pikenin O.O.</b><br>CFD MODELING OF THE IMPACT OF CHANGES IN THERMAL LOAD ON THE THERMAL<br>AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF THE N-50-3.9-440GM (GM-50) BOILER.....                              | 178 |
| <b>Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Mukminov I.I., Pysarevskiy I.I., Hrechanovskiy A.P.</b><br>PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF LOW-TEMPERATURE THERMAL ENERGY<br>STORAGE SYSTEMS FOR GREENHOUSES.....                                                | 186 |
| <b>Brunetkin O. I., Muzyka D.O., Taffi V.V.</b><br>SIMULATION MATHEMATICAL MODEL OF GASIFICATION OF ORGANIC<br>RAW MATERIALS.....                                                                                                                    | 192 |
| <b>Voinov O.P., Elkin Yu.H.</b><br>ABOUT INFLUENCE OF EXTERNAL EROSION PROCESS ON RESOURCE<br>OF FLUIDIZED BED STEAM BOILERS.....                                                                                                                    | 202 |
| <b>Volianska Ya.B., Volyanskyy S.M., Volianskyi Yu.S., Yashchenko V.S., Mytsyk A.I.</b><br>EVALUATION OF THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF SOLAR POWER PLANTS<br>CONSIDERING SEASONAL AND DIURNAL VARIATIONS IN SOLAR IRRADIANCE<br>AND LOAD DEMAND..... | 210 |
| <b>Doroshenko V.V.</b><br>THERMAL ENERGY GENERATION IN AN OIL WELL VIA AN EXOTHERMIC<br>CHEMICAL REACTION.....                                                                                                                                       | 216 |
| <b>Skalozubov V.I., Katsarsky Yu.S., Mazur E.V., Verbilo I.M., Derbenov G.S.</b><br>QUALIFICATION OF SAFETY SYSTEM TESTING STRATEGIES WITH INCREASED<br>DURATION OF FUEL CAMPAIGNS OF NUCLEAR POWER PLANTS.....                                      | 223 |
| <b>Usenko A.Yu., Forys S.M., Biliaieva V.V.</b><br>BIOMETHANE IN COGENERATION UNITS FOR THE AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY<br>OF AGRO-INDUSTRIAL FACILITIES.....                                                                                           | 229 |

## CHEMICAL TECHNOLOGY

|                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Shokota M.Yu., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L.</b><br>RESEARCH INTO THE PATTERNS OF SYNTHESIS OF NANOSCALE MAGNESIUM<br>HYDROXIDE WITH A MODIFIED SURFACE..... | 239 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Brovin O.Yu, Kovalenko Yu.I., Leshchenko S.A, Deribo S.G.</b>                                                                                                   |     |
| INFLUENCE OF NITRATE IONS ON THE ANODIC BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOYS.....                                                                                          | 247 |
| <b>Volodymyrov V.V.</b>                                                                                                                                            |     |
| NANOADDITIVES IN COMPOSITE MATERIALS FOR USE IN RADIOELECTRONIC DEVICES:<br>EFFECTS ON RHEOLOGY, MICROSTRUCTURE, AND RELIABILITY<br>OF ELECTRONIC CONNECTIONS..... | 254 |
| <b>Vorobiova V.I., Pozniak K.O., Skyba M.I.</b>                                                                                                                    |     |
| SELECTION OF COMPONENTS FOR THE DESIGN OF HYDROPHOBIC LOW-TEMPERATURE<br>DEEP EUTECTIC SOLVENTS (TYPE V) BASED ON QUANTUM-CHEMICAL MODELING.....                   | 263 |
| <b>Dundukov P.O., Ushchapovskiy D.Yu.</b>                                                                                                                          |     |
| LOCAL ELECTROCHEMICAL DEPOSITION<br>OF COPPER MICRO-SIZED ELEMENTS OF THE PRINTED BOARD PATTERNS.....                                                              | 269 |
| <b>Yefimova V.G., Pilipenko T.M., Semenets Yu.V.</b>                                                                                                               |     |
| RESEARCH OF PHYSICO CHEMICAL CHARACTERISTICS OF COSMETIC EMULSIONS<br>STABILIZED WITH A MIXTURE OF SURFACE ACTIVE SUBSTANCES.....                                  | 276 |
| <b>Zolotarova O.V.</b>                                                                                                                                             |     |
| RESEARCH OF SULFURIC ACID PRODUCTION WITH THE DEVELOPMENT<br>OF THE SULFUR-CONTAINING RAW MATERIALS ROASTING STAGE.....                                            | 282 |
| <b>Mitina N.B., Mitina Yu.O.</b>                                                                                                                                   |     |
| ASSESSMENT OF DESTRUCTIVE PROCESSES IN POLYPROPYLENE MEDICAL WASTE<br>UNDER BIOLOGICAL INFLUENCE.....                                                              | 287 |
| <b>Ponomarev M.E.</b>                                                                                                                                              |     |
| NOVEL METHOD FOR QUANTIFICATION OF THE IMPACT OF SOLVENT PARAMETERS<br>TO THE EFFECT ON THE RATES OF UNIMOLECULAR HETEROLYSIS REACTIONS.....                       | 295 |
| <b>Soldatenkov V.Yu., Melnyk L.I.</b>                                                                                                                              |     |
| MODERN STRATEGIES FOR THE DEVELOPMENT OF RESOURCE-EFFECTIVE<br>FLOURINE-FREE ECO-FRIENDLY HYDROPHOBIC COATINGS.....                                                | 301 |
| <br><b>TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING<br/>AND CONSUMER GOODS INDUSTRY</b>                                                                                           |     |
| <b>Danyliuk I.P., Strutynska L.T.</b>                                                                                                                              |     |
| PRODUCTION TECHNOLOGY AND QUALITY INDICATORS OF FUNCTIONAL<br>GLUTEN-FREE HAMBURGERS BUNS BASED ON ALTERNATIVE RAW MATERIALS.....                                  | 313 |
| <b>Kovach O.I.</b>                                                                                                                                                 |     |
| WORLD PRODUCTION OF PETILLANT NATUREL SPARKLING WINES, TECHNOLOGIES<br>AND TRENDS.....                                                                             | 322 |
| <br><b>TRANSPORT</b>                                                                                                                                               |     |
| <b>Volobuyeva T.V., Kuvshinov A.O., Minakov V.M., Stepanov O.V.</b>                                                                                                |     |
| CONCEPT OF DEVELOPMENT OF MOTOR TRANSPORT IN UKRAINE IN THE CONTEXT<br>OF EUROPEAN INTEGRATION.....                                                                | 328 |
| <b>Doshchenko H.G., Nahovskyi D.A.</b>                                                                                                                             |     |
| METHODOLOGY FOR PREDICTING THE STATE OF ELECTRICAL EQUIPMENT<br>USING PARAMETRIC FAILURE INDICATORS.....                                                           | 334 |
| <b>Ivanchenko D.A., Turpak S.M., Ostrohliad O.O., Mishniev A.S., Sklyarenko Yu.O.</b>                                                                              |     |
| STRATEGY FOR OPTIMIZING ROAD TRANSPORTATION OF PERISHABLE GOODS<br>USING INTELLIGENT TECHNOLOGIES DURING MILITARY CHALLENGES.....                                  | 344 |
| <b>Kiselyov V.B., Nazarova A.P.</b>                                                                                                                                |     |
| CONSTRUCTION OF RATIONAL ROUTES FOR TRANSPORTATION OF OVERSIZED CARGO<br>ON THE NETWORK OF GENERAL USE ROADS OF STATE IMPORTANCE.....                              | 350 |
| <b>Litviak V.I.</b>                                                                                                                                                |     |
| PRICING FACTOR CLASSIFICATION CONTAINER DELIVERY<br>VIA THE TRANS-CASPIAN INTERNATIONAL TRANSPORT ROUTE.....                                                       | 359 |

|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Myroniuk I.I., Vasilova H.S., Goretskyi O.A., Yurchenko D.O.</b><br>TRANSPORT AND OPERATIONAL SOLUTIONS FOR COLD CHAIN EXPORT<br>OF UKRAINIAN PERISHABLE PRODUCTS TO THE EU.....                  | 366 |
| <b>Pavlova N.L.</b><br>INTERACTION MECHANISM OF TRANSPORT BUSINESS ENTITIES IN THE ORGANIZATION<br>OF CARGO DELIVERY.....                                                                            | 373 |
| <b>Silvanskaya G.N.</b><br>GLOBAL TRENDS IN YACHTING MARKET DEVELOPMENT SCENARIO<br>AND CLUSTER APPROACH.....                                                                                        | 380 |
| <b>Fomin O.V., Khara M.V., Maslak H.V., Sushchenko R.V., Kaplunovska A.M.</b><br>DIGITAL TWINS IN TEST AUTOMATION FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION<br>OF RAILWAY INFRASTRUCTURE FACILITIES..... | 396 |
| <b>Chernenko P.V., Nikonenko A.M., Parii S.H.</b><br>SUCHASNI RUKHOMI REPAIR MACHINERY OF ARMORED VEHICLES – THE KEY<br>BEFORE VIYNT'S VICTORY.....                                                  | 402 |
| <b>Shpak N.G., Litachevskyi V.V.</b><br>ANALYSIS OF THE QUALITY LEVEL OF FREIGHT FORWARDING SUPPORT<br>FOR INTERNATIONAL CARGO FLOWS.....                                                            | 409 |
| <br><b>CONSTRUCTION</b>                                                                                                                                                                              |     |
| <b>Husiev R.O., Malikov S.D.</b><br>PREDICTION OF DAMAGE IN CONCRETE PROTECTIVE STRUCTURES UNDER EXPLOSIVE<br>LOADING BASED ON DIMENSIONLESS PARAMETERS.....                                         | 415 |
| <br><b>GEODESY</b>                                                                                                                                                                                   |     |
| <b>Pilicheva M.O.</b><br>PROJECT MANAGEMENT IN LAND MANAGEMENT: MODERN METHODS AND TOOLS.....                                                                                                        | 425 |
| <br><b>ELECTRONICS</b>                                                                                                                                                                               |     |
| <b>Barylo N.H., Brych M.V., Pryshliak S.O., Brych P.V., Akopian V.H., Varkiv D.V.</b><br>MODELING OF SPECTRAL PHOTSENSORS USING MULTIPLICATIVE-INTEGRAL<br>TRANSFORMATIONS.....                      | 431 |
| INFORMATION ABOUT AUTHORS.....                                                                                                                                                                       | 439 |

УДК 621.647.23

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/01>**Омелич М.Ф.**<https://orcid.org/0000-0002-1884-1540>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Васильєв Г.С.**<https://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТОТНОЇ МОДУЛЯЦІЇ УЛЬТРАЗВУКУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ВІД КАРБОНАТНИХ ОСАДІВ

Ультразвукова кавітація – це складний фізичний процес, що виникає в рідинах під дією потужних акустичних коливань. Введення ультразвукової кавітації в сучасні технологічні процеси є перспективним напрямом їх інтенсифікації за рахунок унікального впливу на різноманітні фізико-хімічні процеси. Ключовою проблемою, що обмежує ефективність об'ємної обробки середовища ультразвуком, є виникнення стоячих хвиль. Акустична хвиля, випромінювана приводом, відбивається від стінок ємності та поверхні рідини, інтерферує з прямою хвилею, що призводить до утворення стійкої картини з зонами мінімальної (вузли) та максимальної (пучності) інтенсивності коливань. Перспективним інструментом для керування інтерференційною картиною є модуляція електричного сигналу, що подається на випромінювач. Цей метод дозволяє динамічно змінювати параметри акустичного поля без механічних змін у конструкції обладнання.

Розроблено схему потужного генератора ультразвуку з частотою 27 кГц, що використовує гармонійні коливання та додатковий генератор модулятора. Така схема відрізняється тим, що на гармонійні коливання накладається частотна модуляція на частоті 500 Гц. Це дозволило підвищити дисперсність коливального поля за рахунок переміщення локальних мінімумів і максимумів коливань в об'ємі розчину з частотою 500 Гц. Проведено лабораторні випробування запропонованої схеми генерації ультразвуку на прикладі впливу на процес осадження карбонату кальцію із водного розчину. Осадження карбонату кальцію ініціювали шляхом зсуву карбонатної рівноваги при електрохімічному відновленні розчиненого у воді кисню. Ультразвук вводили в середовище у якому відбувалася катодна поляризація обертового робочого електроду, що створювало умови утворення на поверхні шару карбонату кальцію. Експериментально встановлено, що застосування ультразвуку з модуляцією дозволяє попередити осадження карбонату кальцію, в той час, як застосування ультразвуку без модуляції впливає лише на швидкість осадження та поруває осад, не запобігаючи його утворенню.

**Ключові слова:** ультразвук, модуляція, електродіз, карбонат кальцію, ультразвукова потужність

**Постановка проблеми.** Ультразвукова кавітація є ефективним інструментом інтенсифікації фізико-хімічних процесів і широко застосовується в різних промислових технологіях. Вона виникає в рідинному середовищі під дією ультразвукових

коливань унаслідок циклічного чергування зон розрідження та стиску, що супроводжується утворенням, ростом і схлопуванням кавітаційних бульбашок. Саме ці явища зумовлюють локальні екстремальні умови температури, тиску та швидкості

масопереносу, які визначають ефективність ультразвукового впливу на фізико-хімічні процеси.

Водночас на практиці в системах ультразвукової обробки, особливо в замкнених об'ємах, виникає суттєва проблема нерівномірності акустичного поля. Внаслідок інтерференції падаючих і відбитих ультразвукових хвиль формуються стоячі хвилі, що призводить до чергування зон з підвищеною та зниженою інтенсивністю ультразвукових коливань. Це зумовлює просторову неоднорідність кавітаційної активності та, відповідно, різну ефективність інтенсифікації фізико-хімічних процесів у різних частинах об'єму. Така нерівномірність ускладнює керування процесами, знижує відтворюваність результатів і обмежує масштабування ультразвукових технологій, що визначає актуальність досліджень, спрямованих на аналіз і мінімізацію впливу стоячих хвиль у кавітаційних системах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ультразвукова кавітація – це складний фізичний процес, що виникає в рідині під дією потужних акустичних коливань. Його фундаментальний механізм полягає в утворенні мікроскопічних парогазових бульбашок (каверн) у півперіоди розрідження звукової хвилі та їхньому стрімкому схлопуванні в наступні півперіоди стиснення. Цей, на перший погляд, простий цикл є основою для великої кількості промислових технологій, оскільки в момент схлопування бульбашки вивільнюється значна кількість локалізованої енергії. Миттєва потужність, що виділяється, може в тисячі разів перевищувати середню потужність, яку ультразвуковий перетворювач вводить у середовище, створюючи екстремальні локальні умови – високий тиск та температуру.

Стратегічна важливість ультразвукових технологій у сучасній промисловості зумовлена їхньою унікальною здатністю інтенсифікувати різноманітні фізико-хімічні процеси [1, 2]. Ефективність цих технологій базується на комплексі явищ, що супроводжують кавітацію: мікроударний вплив від схлопування каверн, формування інтенсивних акустичних течій та звукокапілярний ефект, що прискорює проникнення рідин у пористі структури. Завдяки цим механізмам ультразвукові апарати знаходять застосування у широкому спектрі застосувань, від делікатного очищення до інтенсивного диспергування. Реалізація цих різноманітних та складних процесів вимагає застосування спеціалізованого обладнання, здатного генерувати та передавати акустичну енергію в технологічне середовище з високою ефективністю.

На сьогоднішньому етапі розвитку ультразвукових технологій найбільш розповсюдженими та домінуючими є п'єзоелектричні випромінювачі [3]. Хоча в промисловості традиційно використовують два основні типи електроакустичних перетворювачів – п'єзоелектричні та магнітострикційні, саме п'єзоелектричні пристрої наразі займають лідерські позиції, які стали де-факто стандартом для сучасного ультразвукового обладнання.

Ключовою проблемою, що обмежує ефективність об'ємної обробки середовища ультразвуком, є виникнення стоячих хвиль. Акустична хвиля, випромінювана приводом, відбивається від стінок ємності та поверхні рідини, інтерферує з прямою хвилею, що призводить до утворення стійкої картини з зонами мінімальної (вузли) та максимальної (пучності) інтенсивності коливань. Це є критичним недоліком, оскільки якість обробки стає вкрай нерівномірною по об'єму. Більше того, максимальна інтенсивність кавітації часто спостерігається безпосередньо на поверхні випромінювачів, що викликає їх прискорене ерозійне руйнування.

Одним із шляхів вирішення проблеми є оптимізація геометрії самої технологічної ємності [4]. Замість простих прямокутних форм застосовуються конструкції, що сприяють формуванню більш дифузного (розсіяного) акустичного поля. Більш гнучким та ефективним інструментом для керування інтерференційною картиною є модуляція електричного сигналу, що подається на випромінювач. Цей метод дозволяє динамічно змінювати параметри акустичного поля без механічних змін у конструкції. Частотна модуляція (ЧМ) зарекомендувала себе як де-факто стандартний та найефективніший електронний метод для гомогенізації кавітаційного поля. Суть методу полягає в тому, що несуча частота сигналу збудження постійно змінюється в певних межах. Постійна зміна частоти сигналу не дозволяє стабілізуватися фізичному розташуванню зон конструктивної та деструктивної інтерференції (пучностей та вузлів). Цей постійний просторовий зсув усереднює акустичну енергію в часі, ефективно розмиваючи статичні «гарячі» та «холодні» плями та замінюючи їх більш гомогенним, усередненим у часі полем кавітації.

Зазвичай, перевірку ефективності ЧМ здійснювали простими експериментами, в яких алюмінієва фольга використовується як індикатор кавітаційної ерозії. Шляхом зміни параметрів модуляції (частоти та індексу) вдається трансфор-



мувати кавітаційне поле з локалізованої плями, що дає низьку якість обробки, в значно більшу та рівномірнішу область, яка забезпечує високу якість ерозійного очищення. Застосування ЧМ для промислових процесів очищення потребує перевірки ефективності на більш складних процесах, ніж руйнування алюмінієвої фольги. Однією із можливих сфер застосування ультразвуку є захист теплообмінного обладнання від утворення накипу [5-7].

**Постановка завдання.** Метою даної роботи було перевірити вплив ультразвуку частотою 27 кГц з частотною модуляцією в межах 500 Гц на процес осадження карбонату кальцію на сталеву поверхню як основа промислової технології попередження утворення карбонатних осадів в промисловому теплообмінному обладнанні.

**Виклад основного матеріалу.** Ефективність будь-якого ультразвукового технологічного процесу безпосередньо залежить від конструкції та робочих параметрів апаратури, яка генерує та передає акустичну енергію в оброблюване середовище. Узагальнена структура сучасного ультразвукового кавітаційного апарату складається з кількох ключових блоків, що виконують взаємопов'язані функції. На рисунку 1 представлена структурна схема ультразвукового кавітаційного апарата, що складається з джерела електричного живлення, генератора потужних електричних коливань ультразвукової частоти, привода-випромінювача та кола електричного зворотного зв'язку.

Сучасні генератори для живлення ультразвукових приводів переважно будуються на базі польових транзисторів (FET), які, порівняно з біполярними, мають значно вищу швидкість та потребують менших струмів для керування, що мінімізує втрати потужності. Для передачі максимальної потужності від вихідного каскаду до привода-випромінювача критично важливим є узгодження їхніх електричних опорів (імпе-

дансів), що зазвичай досягається за допомогою вихідного трансформатора та спеціальних схем узгодження.

Досконалість на рівні апаратної генерації є необхідною, але не достатньою умовою. Фундаментальна фізика хвильових процесів у замкненому об'ємі породжує ключову технологічну проблему – нерівномірність поля, вирішення якої лежить вже у площині керування сигналом.

Для дослідження впливу модуляції на ефективність ультразвукової обробки використовували лабораторну установку (рис. 2). Для збудження ультразвукового випромінювача 14 використовується ультразвуковий генератор 15, що працює на частоті 27 кГц, оснащений блоком для формування сигналу модуляції в межах 500 Гц.

Перевірку впливу модуляції ультразвуку на процес кристалізації карбонату кальцію вивчали електрохімічним методом потенціостатичної поляризації [8, 9]. Вимірювання проводили в скляній ємності об'ємом 1 л, наповненій водопровідною водою і термостатній при температурі  $60 \pm 2,5$  °C. Циліндр з маловуглецевої сталі діаметром 6 мм і довжиною 30 мм обертався зі швидкістю 500 об / хв і слугував робочим електродом електрохімічної комірки. Поверхня електроду була підготовлена шляхом механічного полірування наждачним папером марки Р600 та знежирена. Для поляризації робочого електроду використовували допоміжний електрод із платинової сітки, а в якості електроду порівняння для визначення потенціалу робочого електроду використовувався насичений хлорид-срібний електрод (ХСЕ). Робочий електрод поляризували до потенціалу  $-1,1$  В (ХСЕ) впродовж 120 хв для створення умов осадження карбонату кальцію на його поверхні. В ході поляризації реєстрували залежність струму від часу.

Електрохімічний підхід до дослідження осадження карбонату кальцію заснований на вимі-

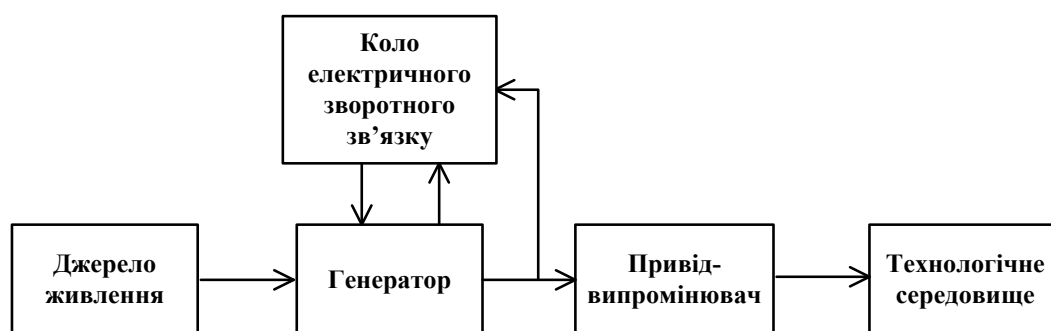


Рис. 1. Структурна схема ультразвукового кавітаційного апарата

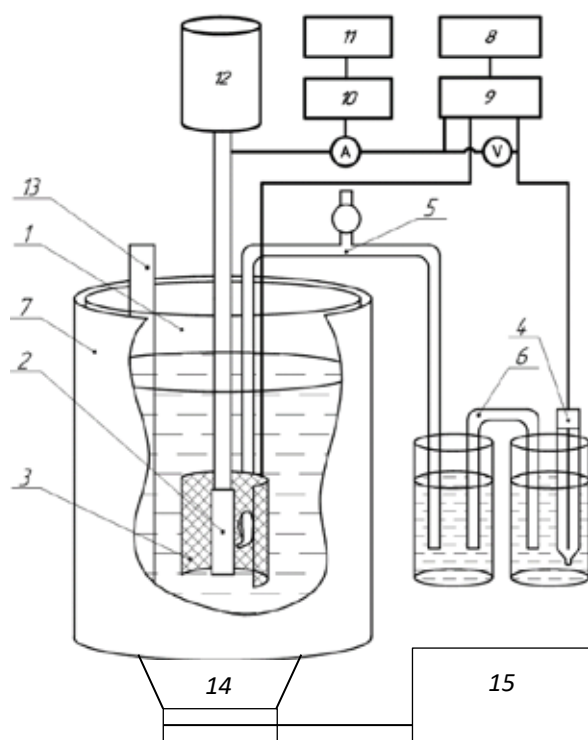


**Рис. 2. Установка для поляризаційних випробувань процесу осадження карбонату кальцію при електрохімічному відновленні кисню**

(1) скляний стакан, (2) робочий електрод (циліндр зі сталі), (3) допоміжний електрод (платинова сітка), (4) електрод порівняння (насичений хлор срібний), (5) капляр Лuggіна, (6) соляний місток, (7) теплоізоляція, (8) джерело постійного струму, (9) потенціостат, (10) перетворювач сигналу, (11) комп'ютер, (12) електродвигун, (13) регульований водонагрівач, (14) ультразвуковий випромінювач, (15) генератор ультразвуку.

рюванні струму відновлення кисню на поверхні сталі при зародженні і утворенні кристалів карбонату кальцію. Кристали карбонату кальцію зменшують площу електрохімічно активної поверхні сталевго електрода [24, 25]. Блокуючі властивості осаду оцінювали шляхом порівняння показників для поверхні електрода з осадом і без. При утворенні осаду струм відновлення кисню  $I$  зменшується пропорційно зменшенню площі електрохімічно активної поверхні. Коли поверхня вільна від будь-яких осадів (одразу після початку поляризації), струм досягає свого найбільшого значення –  $I_0$ . Після закінчення осадження досягається найменше значення струму відновлення кисню –  $I_{\min}$ . На практиці це значення струму вимірювали в кінці кривої залежності струму від часу (після 120 хв. поляризації).

Після завершення осадження карбонату кальцію відновлення кисню може відбуватися тільки на непокритих ділянках або через пори. Звідси пористість осаду  $P$  може бути обчислена як спів-

відношення досягнутого значення струму  $I_{\min}$  до вихідного  $I_0$ .

Швидкість осадження або час осадження,  $t_s$ , було знайдено шляхом лінійної екстраполяції залежності  $I$ – $t$  до нульового струму. Кінетика кристалізації  $\text{CaCO}_3$  в присутності ультразвуку характеризувалася значеннями  $I_0$ ,  $P$  і  $t_s$ .

Криві залежності струму відновлення кисню від часу поляризації для різних умов осадження карбонату кальцію наведено на рис. 3, а обраховані з кривих параметри наведено в таблиці 1.

Хроноамперограма процесу осадження карбонату кальцію за відсутності впливу ультразвуку, наведена на рисунку 3 (1), має типовий вигляд. На початковому етапі (до 300 с) відбувається відносно зростання струму внаслідок відновлення поверхневих оксидних шарів. На наступному етапі, між 300 та 900 с спостерігається індукційний період, коли на поверхні металу зароджуються кристали карбонату кальцію. Починаючи з 900 секунд починається активний ріст осаду, що характеризується монотонним зниженням струму відновлення кисню внаслідок формування на поверхні шару кристалів. З часом, процес осадження відбувається все повільніше, і в кінці струм відновлення кисню досягає постійного значення, що відповідає швидкості відновлення кисню через пори осаду.

При введенні в систему ультразвуку частотою 27 кГц та потужністю 10 Вт хід кривої процесу кристалізації карбонату кальцію залишається незмінним (рис. 3, крива (2), але швидкість осадження збільшується (параметр  $t_s$  зменшується на 600 с). Це відбувається внаслідок того, що під впливом ультразвуку відбувається формування більшої кількості центрів кристалізації, що в ході осадження осаду призводить до швидшого закриття поверхні осадом. Сформовані в об'ємі вузли і пучності ультразвукового поля призводять до того, що ультразвукова кавітація лише інтенсифікує процес осадження, не впливаючи на видалення осаду.

Введення в об'єм розчину ультразвуку з модуляцією (27 кГц, 500 Гц модуляція) суттєво змінює хід хроноамперограми (рис. 3, крива (3)). Так, на залежності струму від часу вже не спостерігаються індукційного періоду та кристалізації осаду, навпаки струм залишається незмінно високим впродовж всієї тривалості експерименту. Поясненням такого явища є те, що під дією ультразвуку з модуляцією кавітація, що виникає в розчині, розмиває вузли і пучності, що виникають в розчині при незмінній ультразвуковій частоті. Таким чином, поширення кавітації по всьому об'єму при

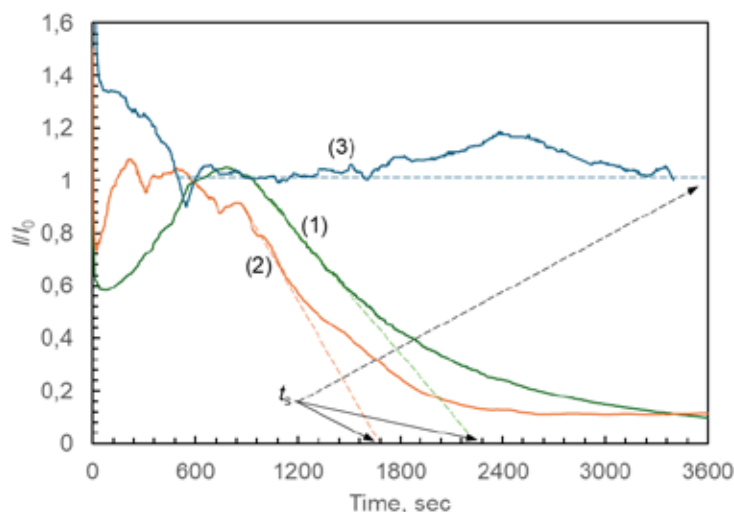


**Рис. 3. Нормалізовані хроноамперограми осадження карбонату кальцію з різних умов впливу ультразвуку на процес осадження**

(1) – без ультразвуку; (2) – ультразвук без модуляції; (3) – ультразвук з модуляцією.

Таблиця 1

**Параметри процесу кристалізації карбонату кальцію в різних умовах впливу ультразвуку**

| № | Умови формування осаду   | Вихідний струм, $I_0$ , мА/см <sup>2</sup> | Час осадження, $t_s$ , сек | Кінцевий струм, $I_{min}$ , мА/см <sup>2</sup> | Поруватість осаду, Р, % |
|---|--------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|
| 1 | Без ультразвуку          | 8                                          | 2300                       | 0,1                                            | 1,25                    |
| 2 | Ультразвук без модуляції | 12                                         | 1700                       | 0,64                                           | 5,33                    |
| 3 | Ультразвук з модуляцією  | 13                                         | $\infty$                   | 10                                             | 100,0                   |

незмінній потужності ультразвуку є достатнім для того, що руйнувати та видаляти будь які зародки кристалів з поверхні, таким чином запобігаючи утворенню осаду.

Таким чином, введення в об'єм розчину ультразвуку з модуляцією має достатню ефективність щоб руйнувати кристали осаду карбонату кальцію та повністю попереджати його осадження на сталевій поверхні із водопровідної води.

**Висновки.** Розроблено електричну схему ультразвукового генератора, що дозволяє генерувати ультразвук на частоті 27 кГц з частотною модуляцією 500 Гц та потужністю 10 Вт та перевірено її ефективність для процесу запобігання утворення карбонатного накипу на сталевій поверхні.

Проведено випробування впливу ультразвуку з модуляцією на процес осадження карбонату кальцію при електрохімічному відновленні кисню на сталевому електроді у водопровідній воді. Встановлено, що ультразвукова кавітація, створена під дією ультразвуку частотою 27 кГц з частотною модуляцією в межах 500 Гц, має достатню ефективність щоб руйнувати кристали карбонату кальцію і, таким чином, запобігати утворенню осаду на поверхні сталі.

Використання ультразвуку з частотною модуляцією відкриває широкі перспективи для розробки простих та ефективних приладів для захисту промислового теплообмінного обладнання від накипу.

#### Список літератури:

1. Atobe M. Electrosynthesis Under Ultrasound and Centrifugal Fields *Encyclopedia of applied electrochemistry*. New York: Springer New York. 2014. P. 821–826. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5\\_362](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5_362)
2. Yang G., Zhu J. J. Sono-electrochemical Synthesis and Characterization of Nanomaterials *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*. Singapore: Springer Singapore. 2016. P. 295–324. [https://doi.org/10.1007/978-981-287-278-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-287-278-4_11)
3. Мовчанюк А. В., Новосад А. А., Омелич М. Ф., Фесич В. П. Метод оцінки амплітуди коливань ультразвукових резонансних приводів, навантажених рідким середовищем. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 4 (56). С. 52–54.

4. Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Чорний В.І. Особливості проектування ультразвукових кавітаційних камер обмеженого об'єму, що утворені плоскими поверхнями. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія Машинобудування*. 2003. № 44. С. 228–233.
5. Heath D., Širok B., Hočevár M. The Use of the Cavitation Effect in the Mitigation of  $\text{CaCO}_3$  Deposits. *Journal of Mechanical Engineering*. 2013. № 59. P. 203–215. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2012.732>
6. Pečnik B., Šturm R., Hočevár M. Cavitation erosion of the calcium carbonate deposits. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 2015. № 10. P. 445–462. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2015.074998>
7. Pečnik B., Hočevár M., Širok B. Scale deposit removal by means of ultrasonic cavitation. *Wear*. 2016. № 356. P. 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.012>
8. Vasyliiev G.S., Vasyliieva S.M. The influence of ultrasound on the carbonate cathodic crystallization in artificial potable water. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017. № 164. H250–H256. <https://doi.org/10.1149/2.0301706jes>.
9. Vasyliiev G., Vasyliieva S., Novosad A., Gerasymenko Y. Ultrasonic modification of carbonate scale electrochemically deposited in tap water. *Ultrasonic Sonochemistry*. 2018. № 48. P. 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasonch.2018.05.026>

#### **Omelych M.F., Vasyliiev G.S. DETERMINATION OF THE EFFECTIVENESS OF FREQUENCY MODULATION OF ULTRASOUND FOR CLEANING STEEL SURFACES FROM CARBONATE DEPOSITS**

*Ultrasonic cavitation is a complex physical process that occurs in liquids under the influence of powerful acoustic vibrations. The introduction of ultrasonic cavitation into modern technological processes is a promising direction for their intensification due to its unique effect on various physicochemical processes. The key problem that limits the efficiency of volumetric processing of the medium with ultrasound is the occurrence of standing waves. The emitted acoustic wave is reflected from the walls of the container and the surface of the liquid, interfering with the direct wave, which leads to the formation of a stable pattern with zones of minimum (node) and maximum (anti-node) intensity of oscillations. A promising tool for controlling the interference pattern is the modulation of the electrical signal supplied to the emitter. This method allows you to dynamically change the parameters of the acoustic field without mechanical changes in the design of the equipment.*

*A circuit of a powerful ultrasound generator with a frequency of 27 kHz using harmonic oscillations and an additional modulator generator has been developed. This scheme differs in that frequency modulation at a frequency of 500 Hz is superimposed on harmonic oscillations. This allowed to increase the dispersion of the oscillation field by moving local minima and maxima of oscillations in the volume of the solution with a frequency of 500 Hz. Laboratory tests of the proposed ultrasound generation scheme were carried out on the example of the effect on the process of precipitation of calcium carbonate from an aqueous solution. The precipitation of calcium carbonate was initiated by shifting the carbonate equilibrium during the electrochemical reduction of oxygen dissolved in water. Ultrasound was introduced into the environment in which the cathodic polarization of the rotating working electrode occurred, which created conditions for the formation of a calcium carbonate layer on the surface. It was experimentally established that the use of ultrasound with modulation allows to prevent the precipitation of calcium carbonate, while the use of ultrasound without modulation affects only the rate of precipitation and porosity of the precipitate, without preventing its formation.*

**Keywords:** *ultrasound, modulation, electrolysis, calcium carbonate, ultrasonic power.*

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.924.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/02>**Кошель О.С.**<https://orcid.org/0009-0006-3788-9298>

Київський національний університет технологій та дизайну

**Залюбовський М.Г.**<https://orcid.org/0000-0002-9183-2771>

Київський національний університет технологій та дизайну

**Кошель С.О.**<https://orcid.org/0000-0001-7481-0186>

Київський національний університет технологій та дизайну

**Кошель Г.В.**<https://orcid.org/0000-0003-1862-1553>

Київська державна академія декоративно-прикладного мистецтва і дизайну імені Михайла Бойчука

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ ЄМНОСТІ НА РУХ МАСИВУ ДЕТАЛЕЙ У МАШИНІ ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

У статті розроблено варіанти плану експериментального дослідження для встановлення взаємного впливу переносної та відносної частот обертання приводних валів машини розробленої конструкції в залежності від робочої довжини технологічного контейнера циліндричної форми, яка рухається в просторі за складною траєкторією на режим руху масиву деталей, що обробляється. Виконано варіанти експериментального дослідження для ряду різних робочих довжин технологічного контейнера галтувальної машини з метою встановлення взаємного впливу переносної та відносної частот обертання приводних валів машини розробленої конструкції на зміну режиму руху масиву деталей в контейнері машини з каскадного на каскадно-водоспадний. Виконано обробку результатів експериментального дослідження за допомогою математичних методів аналізу та встановлено взаємний вплив переносної та відносної частот обертання двох приводних валів галтувальної машини та робочої довжини технологічного контейнера циліндричної форми на появу в технологічному контейнері каскадно-водоспадного руху робочого масиву деталей. Отримано математичні рівняння, які дозволяють з'ясувати взаємозалежність параметрів частот обертання приводних валів галтувальної машини розробленої конструкції для реалізації перехідного режиму руху робочого масиву деталей у технологічному контейнері машини, що дозволяє для деталей того чи іншого асортименту підбирати такі режими їх руху, які би дозволили ефективно виконати їх обробку. Виконано перевірку адекватності отриманих математичних моделей. Практично підтверджена можливість застосування на галтувальній машині розробленої конструкції робочих контейнерів циліндричної форми з різною робочою довжиною. Конструкція машини дозволяє шляхом зміни частоти обертання одного з приводних валів підбирати таку її величину у відповідності до частоти обертання другого вала, коли у технологічному контейнері певної довжини буде спостерігатися поява необхідного для обробки деталей режиму руху. Встановлено, що варіювання довжини технологічного контейнера машини від меншої величини до

більшої призводить до необхідності збільшення величини частоти обертання приводного вала, що відповідає за переносний рух робочого контейнера при одночасному зменшенні частоти обертання вала, який задає йому відносний обертальний рух, щоб рух робочого масиву деталей у контейнері машини відповідав перехідному від каскадного до каскадно – водоспадного режиму.

**Ключові слова:** механізм, галтувальна машина, просторовий рух, деталі легкої промисловості, обробка деталей, обробна машина, експериментальне дослідження, математичні методи аналізу, математичні методи обробки результатів, математична модель, перевірка за критерієм Фішера.

**Постановка проблеми.** На підставі аналізу результатів проведених експериментальних досліджень [1] отримано практичне підтвердження ефективності машин з просторовим складним рухом робочої ємності для проведення процесу обробки деталей з поліефірних матеріалів, а в роботі [2] наведено експериментальні результати, які свідчать, що обробка полімерних деталей легкої промисловості в технологічній ємності закритого типу, що має просторовий складний рух, з використанням технологічного середовища у вигляді гранульованого абразивного матеріалу дозволяє майже в два рази зменшити технологічний час обробки в порівнянні з аналогічними результатами обробки на машинах, в яких ємність мала суто обертальний рух. Відомі запатентовані способи шліфування [3] і полірування [4] деталей, які виготовлено з полімерних матеріалів за допомогою вологого технологічного середовища на галтувальних машинах з просторовим складним рухом технологічної ємності є підтвердженням того, що для обробки деталей легкої промисловості перевагу необхідно надавати машинам, в яких застосовуються робочі ємності замкнутого типу, а їх рух має бути просторовим та складним. Просторовий складний рух робочої ємності машини є також характерним для виконання технологічної операції змішування дрібнодисперсних речовин на харчових, фармацевтичних, будівельних та інших виробництвах [5].

Технологічні операції шліфування та полірування деталей [6], зачищення від облою та гострих кромek, відокремлення деталей від ливників, якщо вони були виготовлені за допомогою технології лиття [7], для деталей, що застосовуються в легкій промисловості варто виконувати за умови забезпечення необхідних режимів їх руху у технологічному контейнері машини для обробки деталей [8].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В галтувальних машинах для обробки деталей з складним рухом робочого контейнера у просторі основою рухомої механічної системи є механізм, який використовується в машинах типу «Turbula» [9]. Структурною особливістю такого просторового механізму є те, що робочий контейнер

механізму одночасно виконує функції проміжної ланки [10], розміри якої чітко обумовлені його кінематичною схемою. Геометричні параметри просторового механізму з одним ведучим та іншим веденим кривошипам суттєво впливають на величини реакцій, що виникають в його кінематичних парах, їх варіювання може призвести до критично небезпечних для працездатності механізму величин [11], а тому конструкція машини не дозволяє застосування робочих контейнерів різної довжини. Зауважимо, що робоча довжина технологічного контейнера машини для обробки деталей є важливим технологічним параметром, що впливає на процес обробки деталей.

Машина удосконаленої конструкції [12, 13] розроблена для обробки деталей індустрії моди різного асортименту, а отже, використання робочих контейнерів різної довжини для їхньої обробки є технологічною необхідністю. Машина розробленої конструкції [14] не має функціональних обмежень в використанні робочих контейнерів різної довжини та геометричної форми.

Встановлення залежностей між робочими частотами обертання ведучих валів машини та режимами руху робочого масиву деталей в контейнері машини є актуальною задачею [15].

**Постановка завдання.** Виконати експериментальне дослідження взаємного впливу частот обертання приводних валів машини розробленої конструкції, для яких спостерігається зміна режиму руху масиву деталей з каскадного на каскадно – водоспадний в залежності від обраної робочої довжини технологічного контейнера циліндричної форми у галтувальній машині.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментальна машина для обробки деталей з просторовим складним рухом технологічного контейнера циліндричної форми (рис. 1) містить корпус з напрямними 1, на яких кріпиться нерухома 2 та розміщена рухома стійка 3. На нерухомій стійці 2 розташовано підшипникову опору ведучого вала переносного руху 6 технологічного контейнера 9, до якого жорстко приєднується кривошип із противагою 4, який разом з ним обертається та задає переносний обертальний рух циліндричному контейнеру відносно геометричної осі вала



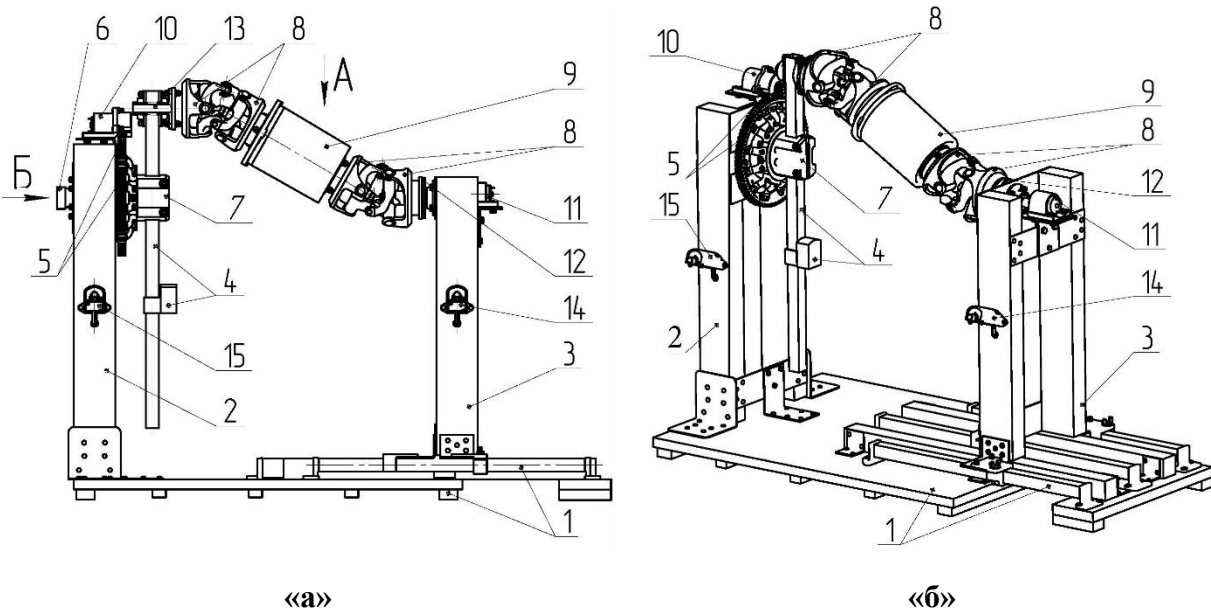


Рис. 1. Експериментальна машина для обробки деталей розробленої конструкції («а» – вид спереду, «б» – наочне зображення)

6. Довжину кривошипа можна змінювати за допомогою муфти 7. З іншого боку, на рухомій стійці 3 знаходиться підшипникова опора іншого ведучого вала відносного руху 12 циліндричного контейнера 9, який обертається та задає обертальний відносний рух контейнеру циліндричної форми навколо своєї геометричної осі. Ведучі вали 6 та 12 кінематично знаходяться в з'єднаному стані за допомогою просторового кінематичного ланцюга, до складу якого надходять технологічний контейнер 9 з розташованими по різні боки двома шарнірами кутових швидкостей 8, які з однієї сторони кінематично приєднані до ведучого вала відносного руху 12 контейнера 9, а з іншої – до кривошипа за допомогою опорної осі 13. Ведучі вали 6 та 12 розташовуються по різні боки по відношенню до просторового кінематичного ланцюга та мають спільну геометричну вісь обертання – вали розташовано співвісно.

Технологічний контейнер 9 разом з робочим масивом деталей в машині розробленої конструкції отримує складний просторовий рух від двох незалежних приводів переносного руху 10 та відносного руху 11, які, відповідно, з одного боку за допомогою зубчастої передачі приводу кривошипа 5 задають контейнеру 9 переносний обертальний рух навколо спільної геометричної осі валів 6 та 12, а з іншого – відносний обертальний рух навколо геометричної осі контейнера циліндричної форми. Машина укомплектована органами незалежного керування частотою та напрямком обертання ведучих валів 6 та 12: для ведучого

вала відносного руху 12 – контролером 14 відносного руху робочого контейнера, для ведучого вала переносного руху 6 – контролером 15 переносного руху контейнера.

Наявність двох незалежних приводів в машині дозволяє забезпечити складний рух технологічного контейнера 9 з можливістю регулювання динамічних параметрів його руху в широкому діапазоні величин, що є важливим для підбору необхідних режимів руху для об'ємної поверхневої обробки масиву деталей широкого споживчого асортименту, який є характерним для деталей, що використовуються в легкій промисловості.

Згідно з планом проведення експериментальних досліджень (табл. 1) реалізовано варіанти 37 – 42 експерименту для довжини технологічного контейнера  $l=0,21$  м з метою встановлення взаємного впливу переносної  $n_{5c}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини розробленої конструкції, для яких спостерігається зміна режиму руху масиву деталей з каскадного на каскадно- водоспадний в залежності від обраної робочої довжини технологічного контейнера циліндричної форми.

У таблиці 2 представлено отримані результати виконаного експериментального дослідження для серії паралельних трьох повторень ( $n=3$ ) для кожного з проведених експериментів. Також у таблиці наведено середню величину параметра частоти обертання ведучого вала  $n_{3r}$ , що відповідає за відносний рух технологічного контейнера. На рівні кожного фактора кількість повторень експеримен-

Таблиця 1

**Варіанти плану експериментального дослідження для встановлення впливу переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини в залежності від довжини контейнера циліндричної форми на режим руху деталей**

| Варіант | Значення факторів                                                        |                                                              |                                               | Частота відносного обертання технологічного контейнера $n_{3r}$ , об/хв | Примітка                                            |
|---------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|         | Частота переносного обертання технологічного контейнера $n_{se}$ , об/хв | Довжина технологічного контейнера циліндричної форми $l$ , м | Кут нахилу технологічного контейнера $\alpha$ |                                                                         |                                                     |
| 37      | 0                                                                        | 0,21                                                         | 36,7                                          | $n_{3r}$                                                                | Дослідження зміни руху масиву деталей у контейнері. |
| 38      | 10                                                                       | 0,21                                                         | 36,7                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 39      | 20                                                                       | 0,21                                                         | 36,7                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 40      | 30                                                                       | 0,21                                                         | 36,7                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 41      | 40                                                                       | 0,21                                                         | 36,7                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 42      | 50                                                                       | 0,21                                                         | 36,7                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 43      | 0                                                                        | 0,25                                                         | 33,0                                          | $n_{3r}$                                                                | Дослідження зміни руху масиву деталей у контейнері. |
| 44      | 10                                                                       | 0,25                                                         | 33,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 45      | 20                                                                       | 0,25                                                         | 33,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 46      | 30                                                                       | 0,25                                                         | 33,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 47      | 40                                                                       | 0,25                                                         | 33,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 48      | 50                                                                       | 0,25                                                         | 33,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 49      | 0                                                                        | 0,29                                                         | 30,0                                          | $n_{3r}$                                                                | Дослідження зміни руху масиву деталей у контейнері. |
| 50      | 10                                                                       | 0,29                                                         | 30,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 51      | 20                                                                       | 0,29                                                         | 30,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 52      | 30                                                                       | 0,29                                                         | 30,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 53      | 40                                                                       | 0,29                                                         | 30,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |
| 54      | 50                                                                       | 0,29                                                         | 30,0                                          | $n_{3r}$                                                                |                                                     |

Таблиця 2

**Експериментальне дослідження до встановлення впливу переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини в залежності від довжини контейнера циліндричної форми на режим руху деталей ( $l=0,21$  м,  $\alpha_{(0)}=36,7^\circ$ ,  $r=0,06$  м)**

| Параметр         | $n_{se} = 0$ , об/хв | $n_{se} = 10$ , об/хв | $n_{se} = 20$ , об/хв | $n_{se} = 30$ , об/хв | $n_{se} = 40$ , об/хв | $n_{se} = 50$ , об/хв |
|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Результат        |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
| $n_{3r}$ , об/хв | 132,00               | 126,75                | 103,00                | 82,00                 | 58,50                 | 27,5                  |
|                  | 137,00               | 123,50                | 106,50                | 84,50                 | 61,00                 | 27,25                 |
|                  | 133,00               | 123,25                | 104,00                | 81,00                 | 59,00                 | 27,75                 |
| $\bar{y}$        | 134,0                | 124,50                | 104,50                | 82,50                 | 59,50                 | 27,5                  |

тальних вимірювань параметра дорівнює три, що підтверджено перевіркою за  $t$  – критерієм Стюдента.

У таблиці 2 та інших:  $r = 0,06$  м = const – радіус технологічного контейнера циліндричної форми розробленої галтувальної машини, м;  $\alpha_{(0)}$  – кут нахилу геометричної осі контейнера циліндричної форми до горизонту для вертикального верхнього положення кривошипу, град.

Згідно з математичними методами обробки результатів експериментальних досліджень [11–13] отримано алгебраїчне рівняння, яке вста-

новлює взаємозалежність параметрів, що досліджуються наступного вигляду:

$$\hat{y} = n_{3r} = -22,2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{se}^2 - 102,98 \cdot 10^{-2} \cdot n_{se} + 134,88, \quad (1)$$

За рівнянням (1) побудовано графічну залежність (рис. 2), за якою аналізуємо взаємний вплив переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів з урахуванням довжини  $l=0,21$  м контейнера циліндричної форми на появу каскадно – водоспадного режиму руху масиву деталей у технологічному контейнері розробленої галтувальної машини.



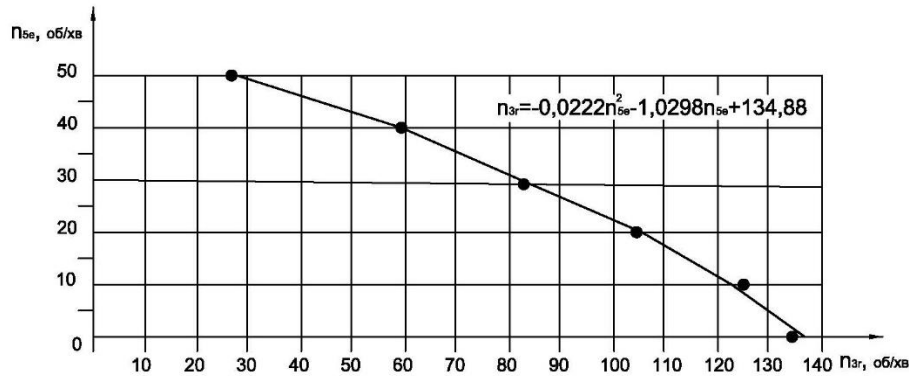


Рис. 2. Графічна залежність впливу переносної  $n_{се}$  та відносної  $n_{зр}$  частот обертання приводних валів машини на появу каскадно – водоспадного режиму руху деталей у контейнері машини ( $l=0,210$  м)

Виконуємо перевірку адекватності отриманого алгебраїчного рівняння з довірчою вірогідністю 0,95 за критерієм Фішера. Для варіантів експерименту 37 – 42 (табл. 1) з довжиною технологічного контейнера  $l=0,21$  м результати розрахунків представлено у таблиці 3.

За результатами перевірки адекватності математичних розрахунків маємо підтвердження стосовно того, що результати експериментального аналізу та аналогічні, які отримано за допомогою математичної моделі співпадають з 95% вірогідністю. Порівняння критерію Фішера, величина якого розраховано за результатом проведеного експерименту менша за його табличне значення для довірчої вірогідності 0,95 ( $F_{розр} = 3,25 < F_{табл} = 3,49$ ).

Згідно з варіантами плану експериментального дослідження (табл. 1) проведено варіанти експерименту 43 – 48 та 49 – 54, відповідно, для довжин

робочих контейнерів  $l=0,25$  м та  $l=0,29$  м для того, щоб встановити взаємний вплив переносної  $n_{се}$  та відносної  $n_{зр}$  частот обертання приводних валів машини розробленої конструкції на утворення каскадно – водоспадного режиму руху масиву деталей.

В таблицях 4 та 5 наведено результати проведених досліджень. Представлено отримані параметри експериментів з урахуванням рекомендацій, які отримано за розрахованим критерієм Стюдента щодо кількості повторень кожного з них, визначено середню їх величину  $\bar{y}$ .

За методом найменших квадратів отримано алгебраїчні рівняння впливу переносної  $n_{се}$  та відносної  $n_{зр}$  частот обертання приводних валів машини розробленої конструкції в залежності від довжини технологічного  $\bar{y}$  контейнера циліндричної форми ( $l=0,25$  м та  $l=0,29$  м) на режим руху масиву деталей:

Таблиця 3

Математична обробка результатів експериментального дослідження для встановлення впливу переносної  $n_{се}$  та відносної  $n_{зр}$  частот обертання приводних валів машини в залежності від довжини контейнера циліндричної форми на режим руху деталей ( $l=0,21$  м,  $\alpha_0=36,7^\circ$ ,  $r=0,06$  м).

Математична модель:  $y = n_{зр} = -22,2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{се}^2 - 102,98 \cdot 10^{-2} \cdot n_{се} + 134,88$

| Варіант | $n_{се}$ , об/хв,<br>$x$ | $n_{зр}$ , об/хв,<br>$\bar{y}$ | $x^2$ | $x \cdot \bar{y}$ | $\hat{y}$ |         |
|---------|--------------------------|--------------------------------|-------|-------------------|-----------|---------|
| 37      | 0                        | 134,0                          | 0     | 0,0               | 134,88    | 0,7744  |
| 38      | 10                       | 124,5                          | 100   | 1245,0            | 122,36    | 4,5710  |
| 39      | 20                       | 104,5                          | 400   | 2090,0            | 105,40    | 0,8172  |
| 40      | 30                       | 82,5                           | 900   | 2475,0            | 84,01     | 2,2680  |
| 41      | 40                       | 59,5                           | 1600  | 2380,0            | 58,17     | 1,7742  |
| 42      | 50                       | 27,5                           | 2500  | 1375,0            | 27,89     | 0,1521  |
| Сума    | 150                      | 532,5                          | 5500  | 9565,00           | 532,71    | 10,3570 |

Дисперсія адекватності  $S_{ad}^2 = 10,3570$

Дисперсія відтворення  $S_{\{y\}}^2 = 3,1875$

Критерій Фішера (розрахунок) –  $F_{розр} = 10,3570/3,1875 = 3,25$

Критерій Фішера для вірогідності 0,95% (таблиця) –  $F_{табл} = 3,49$

Таблиця 4

Експериментальне дослідження до встановлення впливу переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини в залежності від довжини контейнера  $(\bar{y} - \hat{y})^2 \bar{y}$  циліндричної форми на режим руху деталей ( $l=0,25$  м,  $\alpha_{(l)}=33,0^\circ$ ,  $r=0,06$  м)

| Параметр         | $n_{se} = 0$ , об/хв               | $n_{se} = 10$ , об/хв            | $n_{se} = 20$ , об/хв            | $n_{se} = 30$ , об/хв          | $n_{se} = 40$ , об/хв          | $n_{se} = 50$ , об/хв          |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Результат        |                                    |                                  |                                  |                                |                                |                                |
| $n_{3r}$ , об/хв | 128,25<br>132,0<br>132,75<br>131,0 | 124,0<br>122,0<br>120,0<br>122,0 | 102,5<br>104,5<br>102,0<br>103,0 | 83,75<br>85,25<br>84,5<br>84,5 | 61,25<br>61,0<br>62,25<br>61,5 | 32,25<br>33,25<br>32,0<br>32,5 |

Таблиця 5

Експериментальне дослідження до встановлення впливу переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини в залежності від довжини контейнера циліндричної форми на режим руху деталей ( $l=0,29$  м,  $\alpha_{(l)} = 30,0^\circ$ ,  $r=0,06$  м)

| Параметр         | $n_{se} = 0$ , об/хв             | $n_{se} = 10$ , об/хв              | $n_{se} = 20$ , об/хв           | $n_{se} = 30$ , об/хв           | $n_{se} = 40$ , об/хв          | $n_{se} = 50$ , об/хв          |
|------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Результат        |                                  |                                    |                                 |                                 |                                |                                |
| $n_{3r}$ , об/хв | 128,0<br>131,5<br>127,5<br>129,0 | 119,25<br>121,5<br>119,25<br>120,0 | 104,0<br>102,3<br>99,7<br>102,0 | 84,00<br>82,25<br>85,75<br>84,0 | 63,5<br>62,75<br>62,75<br>63,0 | 35,75<br>35,0<br>35,75<br>35,5 |

$$\hat{y} = n_{3r} = -20,7 \cdot 10^{-3} \cdot n_{se}^2 - 94,29 \cdot 10^{-2} \cdot n_{se} + 131,64, \text{ та (2)}$$

$$\hat{y} = n_{3r} = -18,7 \cdot 10^{-3} \cdot n_{se}^2 - 94,27 \cdot 10^{-2} \cdot n_{se} + 129,59. \text{ (3)}$$

За рівняннями (2) та (3) побудовано графічні залежності (рис. 3, 4), за якими аналізуємо взаємний вплив переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини з урахуванням довжин  $l=0,25$  м та  $l=0,29$  м контейнерів циліндричної форми на появу каскадно – водоспадного режиму руху масиву деталей у технологічному контейнері розробленої галтувальної машини.

Виконуємо перевірку адекватності отриманих алгебраїчних рівнянь з довірчою вірогідністю 0,95

за критерієм Фішера. Для варіантів експерименту 43 – 48 та 49 – 54 (табл. 1) з довжиною технологічних контейнерів  $l=0,25$  м та  $l=0,29$  м результати розрахунків представлено у таблицях 6 та 7.

За результатами перевірки адекватності математичних розрахунків маємо підтвердження стосовно того, що результати експериментального аналізу та, відповідно, тих, які отримано за допомогою математичних моделей співпадають з 95% вірогідністю. Порівняння величин критерію Фішера, які розраховано за результатами проведених експериментів є меншими за величиною в порівнянні з аналогічними його табличними значеннями для довірчої вірогідності 0,95 (для

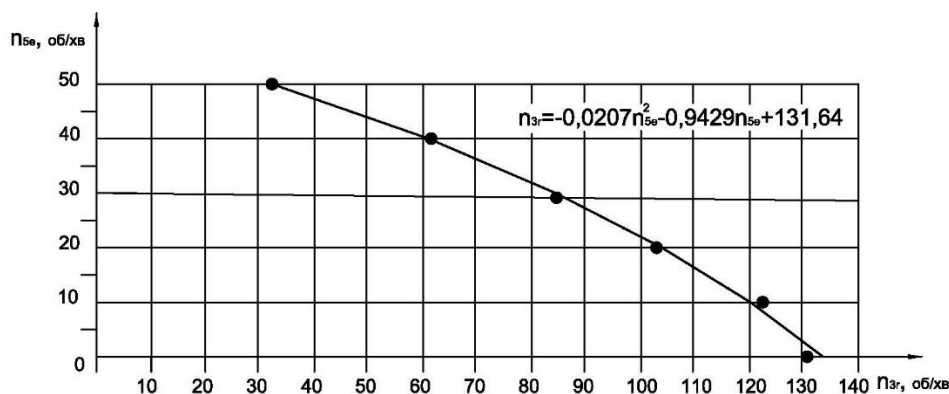


Рис. 3. Графічна залежність впливу переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини на появу каскадно – водоспадного режиму руху деталей у контейнері машини ( $l=0,250$  м)

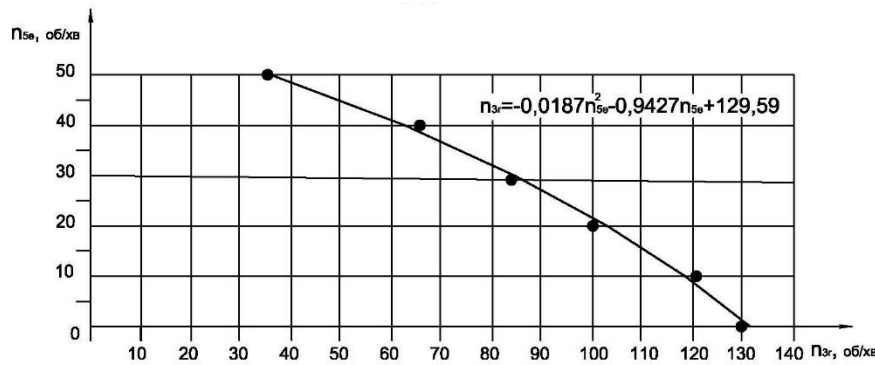


Рис. 4. Графічна залежність впливу переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини на появу каскадно – водоспадного режиму руху деталей у контейнері машини ( $l=0,290$  м)

Таблиця 6

Математична обробка результатів експериментального дослідження для встановлення впливу переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини в залежності від довжини контейнера циліндричної форми на режим руху деталей ( $l=0,25$  м,  $\alpha_0=33,0^\circ$ ,  $r=0,06$  м).

Математична модель:  $\hat{y} = n_{3r} = -20,7 \cdot 10^{-3} \cdot n_{se}^2 - 94,29 \cdot 10^{-2} \cdot n_{se} + 131,64$

| Варіант                                                             | $n_{se}$ , об/хв,<br>$x$ | $n_{3r}$ , об/хв,<br>$\bar{y}$ | $x^2$ | $x \cdot \bar{y}$ | $\hat{y}$ | $(\bar{y} - \hat{y})^2$ |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------|-------------------|-----------|-------------------------|
| 43                                                                  | 0                        | 131,0                          | 0     | 0                 | 131,64    | 0,4096                  |
| 44                                                                  | 10                       | 122,0                          | 100   | 1220              | 120,14    | 3,45588                 |
| 45                                                                  | 20                       | 103,0                          | 400   | 2060              | 104,5     | 2,256                   |
| 46                                                                  | 30                       | 84,5                           | 900   | 2535              | 84,72     | 0,04973                 |
| 47                                                                  | 40                       | 61,5                           | 1600  | 2460              | 60,8      | 0,48442                 |
| 48                                                                  | 50                       | 32,5                           | 2500  | 1625              | 32,75     | 0,06002                 |
| Сума                                                                | 150                      | 534,5                          | 5500  | 9900,00           | 534,56    | 6,7157                  |
| Дисперсія адекватності $S_{ad}^2 = 6,7157$                          |                          |                                |       |                   |           |                         |
| Дисперсія відтворення $S_{\{y\}}^2 = 2,1667$                        |                          |                                |       |                   |           |                         |
| Критерій Фішера (розрахунок) – $F_{розр} = 6,7157/2,1667 = 3,10$    |                          |                                |       |                   |           |                         |
| Критерій Фішера для вірогідності 0,95 (таблиця) – $F_{табл} = 3,49$ |                          |                                |       |                   |           |                         |

Таблиця 7

Математична обробка результатів експериментального дослідження для встановлення впливу переносної  $n_{se}$  та відносної  $n_{3r}$  частот обертання приводних валів машини в залежності від довжини контейнера циліндричної форми на режим руху деталей ( $l=0,29$  м,  $\alpha_0=30,0^\circ$ ,  $r=0,06$  м).

Математична модель:  $\hat{y} = n_{3r} = -18,7 \cdot 10^{-3} \cdot n_{se}^2 - 94,27 \cdot 10^{-2} \cdot n_{se} + 129,59$

| Варіант                                                             | $n_{se}$ , об/хв,<br>$x$ | $n_{3r}$ , об/хв,<br>$\bar{y}$ | $x^2$ | $x \cdot \bar{y}$ | $\hat{y}$ | $(\bar{y} - \hat{y})^2$ |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------|-------------------|-----------|-------------------------|
| 49                                                                  | 0                        | 129,00                         | 0     | 0                 | 129,59    | 0,3481                  |
| 50                                                                  | 10                       | 120,00                         | 100   | 1200,0            | 118,29    | 2,9138                  |
| 51                                                                  | 20                       | 102,00                         | 400   | 2040,0            | 103,26    | 1,5775                  |
| 52                                                                  | 30                       | 84,00                          | 900   | 2520,0            | 84,48     | 0,2294                  |
| 53                                                                  | 40                       | 63,00                          | 1600  | 2520,0            | 61,90     | 1,0774                  |
| 54                                                                  | 50                       | 35,50                          | 2500  | 1775,0            | 35,71     | 0,0420                  |
| Сума                                                                | 150                      | 533,50                         | 5500  | 10055,0           | 533,29    | 6,1884                  |
| Дисперсія адекватності $S_{ad}^2 = 6,1884$                          |                          |                                |       |                   |           |                         |
| Дисперсія відтворення $S_{\{y\}}^2 = 2,4275$                        |                          |                                |       |                   |           |                         |
| Критерій Фішера (розрахунок) – $F_{розр} = 6,1884/2,4275 = 2,55$    |                          |                                |       |                   |           |                         |
| Критерій Фішера для вірогідності 0,95 (таблиця) – $F_{табл} = 3,49$ |                          |                                |       |                   |           |                         |

$l=0,25$  м –  $F_{\text{розр}}=3,10 < F_{\text{табл}}=3,49$ ; для  $l=0,29$  м –  $F_{\text{розр}}=2,55 < F_{\text{табл}}=3,49$ ), а отже, рівняння (2) та (3) є адекватними до результатів отриманих експериментально з вірогідністю 95%.

З рівнянь (1 – 3) та графічних залежностей (рис. 2 – 4) констатуємо той факт, що зміна робочої довжини технологічного контейнера галтувальної машини від  $l=0,21$  м до  $l=0,29$  м та характер взаємозалежності переносної  $n_{\text{se}}$  та відносної  $n_{\text{зr}}$  частот обертання приводних валів машини розробленої конструкції впливає на умови руху масиву деталей в контейнері та його зміну з каскадного на каскадно – водоспадний режим. Щоб зберегти незмінним змішаний режим руху масиву деталей при їх обробці на розробленій галтувальній машині при умові збільшення довжини робочого контейнера від 0,21 м до 0,29 м необхідно збільшувати переносну та одночасно зменшувати відносну частоти обертання приводних валів машини.

При зупиненому приводному валу, що відповідає за переносний рух ( $n_{\text{se}}=0$ , об/хв) технологічного контейнера та зміні довжини контейнера від  $l=0,21$  м до  $l=0,29$  м для забезпечення незміненого каскадно – водоспадного режиму руху масиву деталей необхідно зменшити на 3,8% частоту обертання приводного валу, що відповідає за відносний рух контейнера, а при зупиненому приводному валу, що відповідає за відносний рух кон-

тейнера ( $n_{\text{зr}}=0$ , об/хв) для аналогічних умов зміни довжин ланок та режимів руху деталей необхідно збільшувати на 6,6 % частоту обертання ведучого валу, який відповідає за переносний рух контейнера в порівнянні з аналогічними параметрами, що отримано для довжини контейнера  $l=0,21$  м.

Встановлені взаємозалежності частот обертання приводних валів галтувальної машини дозволяє у відповідності до обраного за довжиною контейнера циліндричної форми регулювати інтенсивність руху масиву деталей в радіальному та осьовому напрямках з метою отримання найкращих умов обробки деталей різного асортименту, які застосовуються в виробі легкої промисловості.

**Висновки.** Виконано експериментальне дослідження взаємного впливу частот обертання приводних валів машини розробленої конструкції, для яких спостерігається зміна режиму руху масиву деталей з каскадного на каскадно – водоспадний в залежності від обраної робочої довжини технологічного контейнера циліндричної форми.

Взаємозалежності частот обертання приводних валів машини дають можливість їх варіювати для обраної довжини технологічного контейнера та отримувати певні за інтенсивністю руху масиву деталей відносно та вздовж геометричної осі контейнера з метою забезпечення найкращих умов для їх обробки.

#### Список літератури:

1. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019, Vol. 2 (132). P. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.2.2>
2. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Kurovskiy V.Y., Kushchevska N.F., Loboda Yu.S., Malyshev V.V. Experimental investigation of the processing of polymeric details in a machine with a complex movement of working capacity. *6-th International Conference «HighMathTech 2019»*, Session H, 2019, P. 154.
3. Спосіб вологого полірування полімерних деталей: пат. 113266 Україна, МПК В24В 31/10 (2006.01). / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В.; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201606525; заяв. 15.06.2016, опуб. 25.01.2017, бюл. № 2.
4. Спосіб вологого шліфування полімерних деталей: пат. № 113267 Україна, МПК В24В 31/10 (2006.01). / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В.; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201606526; заяв. 15.06.2016, опуб. 25.01.2017, бюл. № 2.
5. Jadhav P.S., Jadhav B.R. A study on mixing of composite solids in the three dimensional turbula mixer. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*. 2013, Vol. 2, Issue 3, P. 138–141.
6. Яковенко І.Е., Пермяков О. А., Фесенко А.В. Технологічні основи машинобудування: навч. посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. 421с.
7. Залюбовський М. Г., Малишев В. В. Машини та обладнання підприємств: навч. посібник. К.: Університет «Україна», 2020. 120 с. DOI: <https://doi.org/10.36994/978-966-388-593-3-2020-121>
8. Сокур М.І., Білецький В.С., Божик Д.П., Сокур І.М. Модель руху матеріалу в проточній частині барабанного млина. *Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. Збірник*. 2017. № 66 (107). С. 28–35.
9. Obadele B.A., Masuku Z.H., Olubambi P.A. Turbula mixing characteristics of carbide powders and its influence on laser processing of stainless steel composite coatings. *Powder Technol.* 2012. №. 230. P. 169 – 182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.07.025>
10. Панасюк І.В., Залюбовський М.Г. Визначення кінематичних параметрів змішувачів з тривимірним обертанням барабану. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2013. № 6. С. 28–33.

11. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей: монографія. К.: Університет «Україна», 2018. 228 с. DOI: <https://doi.org/10.36994/978-966-388-575-9-2018-228>

12. Машина для обробки деталей: пат. № 155458 Україна, МПК (2024.01): B01F 31/00, B24B 31/00 (2024 р.) / Кошель С.О., Кошель Г.В., Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Кошель О.С.; заявник та патентовласник Вищий навчальний заклад «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» – u202304573; заяв. 27.09.2023, опуб. 28.02.2024, Бюл. № 9.

13. Машина для обробки деталей: пат. № 160455 Україна, МПК (2025.01): B01F 31/00, B24B 21/00 (2025 р.) / Кошель С.О., Кошель О.С., Панасюк І.В., Залюбовський М.Г., Кошель Г.В.; заявник та патентовласник Вищий навчальний заклад «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» – u202500085; заяв. 07.01.2025, опуб. 10.09.2025, Бюл. № 37.

14. Машина для обробки деталей: пат. № 160695 Україна, МПК (2025.01): B24B 31/00, B01F 31/00 (2025 р.) / Кошель С.О., Кошель О.С., Панасюк І.В., Залюбовський М.Г., Кошель Г.В.; заявник та патентовласник Вищий навчальний заклад «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» – u202500084; заяв. 07.01.2025, опуб. 01.10.2025, Бюл. № 40.

15. Panasyuk I., Zalyubovskiy M. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 3. P. 260-264.

### **Koshel O.S., Zalyubovskiy M.G., Koshel S.O., Koshel H.V. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CONTAINER LENGTH ON THE MOVEMENT OF PARTS IN A MACHINE FOR PROCESSING USING AN EXPERIMENT**

*Variants of the experimental plan have been developed in order to analyze the simultaneous influence of the transfer and relative angular velocities of the drive shafts of the machine of the new structure and design depending on the length of the working container. The geometric shape of the technological container is a cylinder. The working container in space has a complex motion, therefore its trajectory affects the mode of motion of the parts in its middle. For a number of different working lengths of the working container of the tumbling machine, a study was carried out using the conducted. The purpose of the experiment was to determine the simultaneous influence of the transfer and relative angular velocities of the drive shafts of the machine of the new design on the change in the nature of the movement of parts in the container from cascade to cascade-waterfall. The results of the experiment were processed using mathematical analysis methods. According to the results of the processing, the simultaneous influence of the transfer and relative angular velocities of the machine's drive shafts and the length of the working cylindrical technological container on the appearance of a mixed nature of the movement of parts in the container, which is called the cascade-waterfall movement of the working set of parts, was established. The mathematical equations that were obtained allow us to analyze the simultaneous influence of the angular velocities of the drive shafts of the machine of the new structure in order to implement the cascade-waterfall movement of the working set of parts in the working container of the rolling machine. The analysis of such a process makes it possible to choose the necessary motion mode for a set of parts of a different assortment in order to effectively perform their processing. The adequacy of the obtained mathematical equations was checked. The experiment conducted allowed us to obtain confirmation that the use of a new design of a tumbling machine allows the use of cylindrical working containers of various lengths without loss of machine performance. If you change the angular velocities of the drive shafts of a machine of a new structure and design, you can select their values in such a way that they correspond to each other that a certain movement of a set of parts will appear in the working container of the length necessary for performing the technological operation. After analyzing the results of the experiment, it was found that changing the length of the working container of the tumbling machine from a smaller value to a larger one led to the need to increase the angular speed of rotation of the drive shaft, which is responsible for the translational movement of the container, and simultaneously reduce the angular speed of rotation of another drive shaft, which gives it a relative rotational movement, so that the movement of the set of parts in the container had a transition from a cascade to a cascade-waterfall character.*

**Keywords:** mechanism, tumbling machine, spatial motion, light industry parts, parts processing, processing machine, experimental study, mathematical analysis methods, mathematical methods for results processing, mathematical model, Fisher's criterion.

Дата першого надходження статті до видання: 03.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.01.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

## КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 656.61.052.

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/03>

**Шпілевая Т.М.**

<https://orcid.org/0000-0002-3039-8086>

Херсонська державна морська академія

### ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ І ЕКОЛОГІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ДВОПАЛИВНИХ ДВИГУНІВ У СУЧАСНОМУ ФЛОТІ

*Застосування двопаливних двигунів на сучасних морських судах набуває все більшого поширення у зв'язку з посиленням міжнародних екологічних вимог, спрямованих на зменшення викидів шкідливих речовин у атмосферу та зниження негативного впливу судноплавства на навколишнє середовище. Використання альтернативних видів палива, зокрема зрідженого або стисненого природного газу, у поєднанні з традиційними нафтовими паливами, дозволяє суттєво скоротити викиди оксидів сірки, азоту та вуглекислого газу, а також підвищити загальну енергоефективність судових енергетичних установок.*

*Водночас впровадження двопаливних двигунів супроводжується низкою технічних, економічних та експлуатаційних обмежень, серед яких значні інвестиції на стадії впровадження, необхідність створення відповідної паливної інфраструктури, підвищені вимоги щодо систем зберігання та подачі газу, а також певні операційні складності керування двигунами, що працюють на різних типах палива. У роботі здійснюється комплексний аналіз енергоефективності та екологічної доцільності використання двопаливних двигунів на різних типах морських суден з урахуванням сучасних тенденцій розвитку суднобудування та вимог міжнародних нормативних документів.*

*Особливу увагу приділено оцінці перспектив упровадження двопаливних енергетичних установок у комерційному флоті, аналізу їх переваг і недоліків, а також розгляду новітніх технічних рішень, спрямованих на підвищення надійності, безпеки та екологічності судових двигунів. Наводиться інформація про сучасні інженерні розробки та інноваційні технології, впровадження яких прогнозується у найближчій перспективі та які можуть суттєво вплинути на подальший розвиток морського транспорту.*

**Ключові слова:** новітні технології, двопаливні двигуни, технологічні рішення, розвиток суднобудування, альтернативні види палива.

**Постановка проблеми.** Сучасний розвиток світового морського транспорту визначається зростанням вимог до енергоефективності та екологічної безпеки експлуатації суден. Впровадження міжнародних стандартів, зокрема регулюючої Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зменшення викидів парникових газів, оксидів сірки та азоту, зумовлює необхідність пошуку інноваційних технічних рішень у сфері судових енергетичних установок. Одним із перспективних напрямів є застосування двопаливних двигунів, здатних працювати як на традиційних вуглевод-

невих паливах, так і на альтернативних енергоносіях із нижчим рівнем викидів. Використання таких силових установок сприяє не лише підвищенню гнучкості експлуатації та енергетичної ефективності флоту, але й створює технологічні передумови для поступового переходу до низьковуглецевого та безвуглецевого судноплавства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання енергоефективності і екологічності застосування двопаливних двигунів на сучасних судах постійно досліджується численними науковцями. Так, науковці Білоусов Є.В., Марченко А.П., Сав-



чук В.П., Білоусова Т.П. у своїй роботі «Використання метанолу у якості моторного палива для суднових двигунів внутрішнього згорання» виконали детальний огляд властивостей метанолу, технологічних особливостей адаптації двигунів, його переваг та недоліків як морського палива [1]. Аналіз стратегії впровадження зрідженого природного газу, метанолу, аміаку; техніко-економічні аспекти та етапність переходу розглянули у своїй статті Булгаков М.П., Мельник О.М., Терновський В.Б. Науковці Мельник О.М. та ін. провели дослідження стосовно пошуку стійких палив для флоту України, включаючи порівняння вартості та доступності [2]. Робота Железної Т. здійснює порівняння біопалив з іншими альтернативами видами біопалив, економічні прогнози, вплив на викиди [3].

**Постановка завдання.** Основною метою статті є дослідження впливу впровадження двопаливних двигунів на підвищення енергоефективності та зниження екологічного навантаження судноплавства. У роботі передбачається проаналізувати технічні, економічні та екологічні аспекти використання двопаливних енергетичних установок у сучасному флоті, а також оцінити їхню роль у реалізації міжнародних ініціатив щодо декарбонізації морського транспорту, зокрема вимог ІМО щодо скорочення викидів парникових газів.

Під час дослідження даної теми планується визначити переваги і обмеження експлуатації суден з двопаливними двигунами, оцінити ефективність використання альтернативних палив (LNG, метанол, аміак, біопалива), узагальнити практичний досвід впровадження таких технологій у провідних судноплавних компаніях світу, сформулювати рекомендації щодо підвищення екологічної та енергетичної стійкості морського транспорту.

**Виклад основного матеріалу.** В останні два десятиліття, за даними British Petroleum (BP) [5, с. 70], спостерігаються суттєві зміни в структурі світового енергетичного споживання у бік збільшення частки екологічно безпечних первинних джерел енергії. Тим не менш, незважаючи на зростання сумарної складової відновлюваних джерел енергії (включаючи складову гідроенергії), частка викопних видів корисних копалин (вугілля, нафта та газ) у структурі енергоспоживання залишається значною і становить біля 80% і більше. [6, с. 178]

Основним споживачем таких корисних копалин є транспортна інфраструктура, на котру припадає близько 65% споживання нафтопродуктів. При цьому, судноплавна галузь, яка є структурною ланкою транспортної інфраструктури, впливає на всі ці негативні процеси. Проблеми скорочення

емісії шкідливих продуктів згорання від суднових енергетичних установок (СЕУ) відносяться до найважливіших напрямків розвитку сучасного судноплавства та регулюються відповідно до вимог певними міжнародними та національними екологічними стандартами. Перспективним напрямом скорочення шкідливого впливу на навколишнє середовище є, наприклад, використання природного газу як палива [7]. Так, зростання флоту суден-газовозів дозволяє, з одного боку, задовольнити зростаючий попит на вуглеводневі гази в світі, а з іншого боку, призведе до збільшення екологічного навантаження на атмосферу, зокрема, до додаткових викидів парникових газів [8]. Варто відзначити, що сучасне світове двигунобудування відрізняється великою різноманітністю конструкцій, що реалізують різні технології використання газомоторного палива. Компоненти газу широко варіюються за складом та містять важкі вуглеводи. Застосування такого палива в двигунах внутрішнього згорання може викликати проблеми, пов'язані зі значним впливом складу палива на робочий процес двигуна. Провідні виробники суднових двигунів внутрішнього згорання обмежують нижчі показники метанового числа (MN). Наприклад, застосування для двопаливних двигунів WÄRTSILÄ палива з метановим числом WMN <46,8 не рекомендовані до використання, при цьому мольний вміст метану має бути не нижче 70 %, а показник H<sub>2</sub> – не більше 30 % [9]. Потужні двигуни WÄRTSILÄ 50DF знайшли застосування переважно на газовозах, де продукт, що перевозиться, використовується як паливо. Наприклад, газовоз Provalys ємністю 154000 м<sup>3</sup> є найбільшим у світі газовозом, що приводиться в рух двопаливними двигунами. Чотири двигуни WÄRTSILÄ 50DF (три 12-циліндрові та один 6-циліндровий) розвивають сумарну потужність до 39,9 МВт. Газовоз з електрорухомом наочно демонструє такі переваги газового палива, як зниження витрати палива та шкідливих викидів [9]. У 2013 році було прийнято в експлуатацію судно Viking Grace – це перший у світі вантажопасажирський паром (Ro-Pax), оснащений двопаливними двигунами. Паром водотоннажністю 57000 тонн, що належить Viking Line, працює на лінії Туреччина-Стокгольм. Він приводиться в рух чотирма двигунами WÄRTSILÄ 50DF. Аналогічною силовою установкою оснащено новий швидкісний паром Destination Gotland, який будується для шведського оператора Rederi AB Gotland [9].

Сучасні двигуни, оснащені останніми досягненнями техніки, такими як, наприклад, сис-

тема упорскування common rail, новітніми турбокомпресорами, турбінами з регульованим сопловим апаратом, потребують управління безліччю робочих параметрів. Це, у свою чергу, призводить до постійного ускладнення систем управління та моніторингу. Так, система UNIC C3 може бути встановлена на всіх головних суднових та допоміжних двигунах Wärtsilä, що працюють на газі, а саме з іскровим запаленням та на двигунах з застосуванням двох видів палив. Нею обладнано вже понад 6000 двигунів. Вона включає набір з декількох модулів, що істотно скорочує необхідну номенклатуру запчастин. Система встановлюється як на новітні двигуни, так і замість аналогічних застарілих систем у порядку модифікації обладнання, що знаходяться в експлуатації. В звітах IMO та UNCTAD метанол та метанольно-спиртові суміші розглядаються як перспективні замітники традиційних суднових палив [6, с. 178]

Також хотілося б звернути увагу ще кілька сучасних винаходів двопаливних двигунів. Наприклад, Норвезька фірма Solco створила проєкт спеціального судна для автономного виробництва метанолу у відкритому морі потужністю близько 1 млн. т/рік. Це комбінована плавуча система, яка призначена для одночасного видобутку попутного газу і виробництва метанолу. Фірма BHP Petroleum на базі розробок ICI спроектувала та створила технологію отримання метанолу під низьким тиском. Установка з отримання метанолу складається з трьох секцій: отримання синтез-газу, синтезу метанолу, очищення метанолу. Ще одна компанія Wison Engineering (WEL) спроектувала плавучий комплекс з виробництва метанолу FGTM (floating natural gas to methanol) продуктивністю до 1,8 млн. т за рік. Об'єм накопичувальних ємностей судна складає 200000 м<sup>3</sup> [10].

На рис. 1 представлено графічне зображення прикладу системи Dual-Fuel-Electric (двопаливної електроприводної системи) для газовозів від компанії MAN. Воно демонструє, як двигуни можуть працювати на зрідженому природному газі (LNG) або на рідкому паливі – за технологією, що дозволяє оптимізувати ефективність і гнучкість роботи судна.

Технологічні рішення у сфері двопаливних двигунів, котрі в майбутньому будуть ефективно застосовуватися на судах комерційного торгового флоту.

1. Двигуни від виробника Wärtsilä. Моделі двигунів Wärtsilä 20DF, 25DF, 31DF, 34DF, 46DF, 46TS-DF – двигуни, здатні працювати як на LNG, так і на рідкому паливі (LFO, HFO, біопаливі). Перевагами є те, що у них присутня гнучкість палива – seamless переключення між режимами без втрати потужності та швидкості. Основними екологічними перевагами вищезазначеного обладнання являється: значне зниження викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> та часток. Очікується, що двигуни зазначених моделей будуть адаптовані до роботи на альтернативних видах палива.

2. Компанія MAN Energy Solutions приймає участь у введенні в експлуатації плавучих теплових станцій Powerships. Було отримано замовлення на 24 двигуни 18V51/60DF, кожен потужністю 20,7 мегават (МВт). Така модель двигунів забезпечують гнучку та надійну генерацію електроенергії, адаптовану до будь-яких умов [11]

3. Технологія X-DF від WinGD. X-DF двигуни встановлюються на контейнеровозах, що експлуатуються компанією CMA CGM та GasLog, забезпечуючи стабільне згоряння, низькі викиди та високий коефіцієнт корисної дії.[12]

4. Dual-Fuel системи з альтернативними видами палива. Methanol dual-fuel (Caterpillar 3500E) –

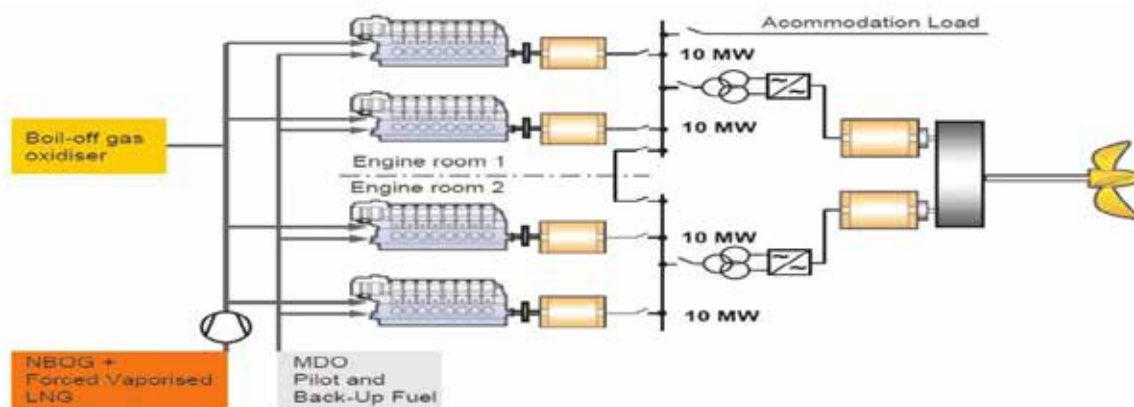


Рис. 1. Система Dual-Fuel-Electric



демонстраційна модель, що працюватиме з метанолом, зберігаючи характеристики дизельного аналога. Компанія Caterpillar Marine оголосила про плани впровадження у 2026 році першої серії демонстраційних морських двигунів 3500E з подвійним паливом на метанолі. Морські двигуни Cat 3500E використовуватимуть інноваційну технологію подвійного палива, яка базується на перевірених дизельних паливних системах і підтримує паливні системи суден з низьким тиском – нижче 10 бар. Двигун Cat 3500E з подвійним паливом на метанолі має таку саму продуктивність і довговічність, як і поточний дизельний двигун 3500E, при цьому відповідаючи стандартам викидів і забезпечуючи 100% потужність. Після значних успіхів у розробці цієї технології виробник двигунів оголосив про підписання меморандуму про взаєморозуміння (MOU) з Damen Shipyards Group щодо випробувань у 2026 році [13].

5. Hydrogen dual-fuel (BeHydro) – перший двигун зазначеного типу, сертифікований Lloyd's Register: дозволяє знизити CO<sub>2</sub> до 85%, за рахунок підтримки традиційного палива як резерву. Lloyd's Register (LR) надав сертифікат типу BeHydro, спільному підприємству CMB.TECH та Anglo Belgian Corporation (ABC), за його двопаливний двигун, що працює на водневому паливі. Це перший сертифікат типу для двопаливного водневого двигуна. Новий двигун, потужність якого становить до 2,7 мегават (МВт), дає судновласникам можливість зменшити викиди CO<sub>2</sub> на 85%, а технологія подвійного палива дозволяє двигуну продовжувати постачати енергію, використовуючи традиційні види палива, коли відновлювана енергія або водень недоступні. Розробка двигуна спрямована як на берегові операції, так і на використання в судноплавстві, і відкриває Be Hydro шлях до розробки водневих двигунів більшої потужності в майбутньому. LR спочатку надала принципове схвалення у вересні 2020 року і провела ретельний і всебічний процес затвердження типу, щоб забезпечити безпеку і придатність матеріалів. [14]

6. Ammonia-fuelled конверсія (Wärtsilä) являється реконструкцією платформи Viking Energy для роботи на аміаку без CO<sub>2</sub>-викидів. Очікується, що у 2026 році така платформа буде введена в експлуатацію. Фінський виробник двигунів Wärtsilä підписав контракт з норвезьким судновласником Eidesvik на переобладнання одного з його суден постачання платформ для роботи на аміачному паливі. Viking Energy стане першим у світі судном, що працює на аміачному паливі. Аміак є одним з декількох альтернативних видів палива,

який прагнуть застосовувати перевізники з метою зменшення викидів вуглецю. [15]

7. LNG-танкери (Anglo American) – флот із 10 суден із двопаливними двигунами, що забезпечують ~35 % скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Компанія Anglo American замовила та експлуатує флот із 10 балкерів типу Capesize+, оснащених двопаливними двигунами на LNG. Цей флот отримав назву Ubuntu fleet. Перший з цих суден, Ubuntu Harmony, почав перевезення залізної руди з Південної Африки (Kumba operations) у 2023 році. Останній з флоту, Ubuntu Liberty, був офіційно переданий у 2024 році, завершивши будівництво усіх 10 суден. [16]

Робота dual-fuel (LNG) у цьому випадку полягає у наступному. Судна можуть працювати як на LNG, так і на традиційному морському паливі (marine oil fuel), що дає гнучкість у виборі палива залежно від доступності LNG та умов рейсу. Використання LNG зменшує викиди CO<sub>2</sub> приблизно на 35 % порівняно з тим же об'ємом перевезення, якби судно працювало на звичайному морському нафтовому паливі. Крім CO<sub>2</sub>, відзначаються й суттєві зниження інших шкідливих викидів: оксидів сірки (SO<sub>x</sub>), оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), частинок (particulate matter) – хоча точні відсотки залежать від умов експлуатації. [17]

**Даний проект має екологічні та операційні переваги:**

**1. Зменшення вуглецевого сліду.** Падіння CO<sub>2</sub> на ~35 % – це вагомий крок до відповідності екологічним цілям (наприклад, Anglo American ставить за мету досягти вуглецевої нейтральності у своїх морських перевезеннях до 2040 року).

**2. Зменшення локального забруднення.** Використання LNG значно знижує викиди SO<sub>x</sub> (близько до нуля), зменшує NO<sub>x</sub> і PM, що корисно для портових зон, прибережних районів та глобальної якості повітря.

**3. Гнучкість та зменшення ризиків.** Судна dual-fuel можуть переходити на традиційне паливо, коли LNG недоступний, що зменшує ризик “енергетичної ізоляції”. Крім того, це дозволяє уникати великих витрат на реконструкцію існуючих суден, бо новобудови вже закладаються з можливістю dual-fuel.

**Поряд з перевагами існують деякі обмеження і недоліки:**

**1. Інфраструктура бункерування LNG.** Щоб переваги застосування двопаливних двигунів були реалізовані, потрібні порти, що можуть забезпечувати LNG як суднове паливо. Флот Ubuntu вже провів понад 30 таких заправок у стратегічних пунктах як Сінгапур та Малайзія. [18]

**2. “Methane slip”** (витік метану). Одна з ключових проблем при використанні LNG – частковий нерозгорілий метан, який може зменшити кліматичну вигідність, якщо не буде мінімізований технологічно. У компанії Ubuntu fleet звертають увагу на застосування нових технологій, щоб знизити цей ефект.

**3. Вища капітальна вартість і складність проекту.** Нові судна із dual-fuel технологією дорожчі у будівництві, потребують спеціальних систем зберігання LNG, утеплення, системи безпеки, додаткового навчання персоналу. Такий проект має ретельно плануватись. [19]

**4. Енергетична щільність пального LNG** має меншу енергетичну щільність за об’ємом у порівнянні з рідким морським паливом, тому для таких суден потрібні більші або додаткові баки/резервуари, а також інші конструкційні рішення. Це може впливати на вантажопідйомність чи ефективність використання простору. (в загальних джерелах на тему LNG-dual fuel цей момент згадується) [20]

#### Ефективність застосування проекту:

Ubuntu флоту Anglo American – один із найяскравіших прикладів того, як dual-fuel технології на LNG можуть забезпечити значне зниження викидів при збереженні конкурентоспроможності перевезень. При цьому важливо усвідомлювати, що максимальна екологічна ефективність можлива за умови:

- наявності якісної інфраструктури для LNG;
- застосування технологій, що мінімізують витік метану;
- відповідних регуляторних стимулів та підтримки зі сторони флоту, портів, держав.

**Висновки.** Отже, як підсумок зазначимо, що основною перевагою двигуна з використанням безпосередньої подачі газу є висока паливна економічність, що перевищує на 5% паливну економічність дизельного двигуна. Проте зважаючи на високу динаміку протікання процесу тепловиділення, аналогічному дизельному двигуну, відпрацьовані гази такого двопаливного двигуна містять підвищений, порівняно з двигунами, що працюють на гомогенних зріджених газових сумішах, вміст оксидів азоту, що забезпечує досягнення тільки стандартів Tier II. До суттєвих недоліків двопаливних двигунів, які використовують гетерогенні технології також слід віднести підвищену складність обладнання для підготовки газоподібного палива з необхідністю використання компресорів і криогенних насосів високого тиску (у разі використання зрідженого природного газу).

Однак, на мою думку, енергетичні установки, що працюють на природному газі, все ж таки можуть розглядатись як перспективна базова конструкція для переходу на екологічно безпечні вуглецево-нейтральні види палива, такі як біогаз, синтетичний газ та ін.

#### Список літератури:

1. Білоусов Є. В., Марченко А. П., Савчук В. П., Білоусова Т. П. Використання метанолу у якості моторного палива для суднових двигунів внутрішнього згоряння. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2024. № 1. С. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.06>
2. Мельник О. М., Булгаков М. П., Кучеренко В. Ю. Стан та динаміка екологічного навантаження від судноплавства в Чорноморському регіоні: тенденції, виклики, технологічні відповіді. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Т. XX. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.21> (дата звернення: 06.01.2026).
3. Мельник О. М. Моделювання взаємозв’язку енергоефективності та безпеки судна на основі множинної лінійної регресії. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Т. XX. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.284042> (дата звернення: 06.01.2026).
4. Драгнев С. В., Железна Т. А., Гайдай О. І. Перспективи використання альтернативних палив на водному транспорті. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2023. Т. 45, № 1. С. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.7>.
5. BP. Statistical Review of World Energy 2021. 70th ed. London : BP, 2021. 70 p. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (дата звернення: 06.03.2024).
6. Шпілевая Т. М., Голдін В. А. Застосування двопаливних двигунів на сучасних судах. *Матеріали СЕУТТОО-2024*. Херсон : Херсонська держ. мор. акад., 2024. С. 178–179
7. Khurana G. Global shipping markets. *Capital Link Greek Shipping Forum*. 2017. URL: <http://forums.capitallink.com/shipping/2018greece/ppt/khurana.pdf> (дата звернення: 06.03.2024).
8. Third IMO GHG Study 2014. Executive summary and final report. London : International Maritime Organization, 2014. URL: <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/third-imo-ghg-study-2014-executive-summary-and-final-report.pdf> (дата звернення: 06.01.2026).

9. WÄRTSILÄ. Wärtsilä GasReformer. 2015. URL: <https://www.offshore-europe.co.uk/novadocuments/31687> (дата звернення: 06.03.2024).
10. Remelje C. Methanol Floating Production Storage and Offloading (MFPSO). Offshore Technology Conference. Houston, 1999. URL: <https://onepetro.org/OTCONF/99OTC/conference/All-99OTC> (дата звернення: 06.03.2024).
11. WÄRTSILÄ. Wärtsilä Methane Number Calculator. 2019. URL: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/gas-solutions/methane-number-calculator> (дата звернення: 06.03.2024).
12. WÄRTSILÄ. Future-proof dual fuel engines. URL: <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines> (дата звернення: 06.03.2024).
13. MAN Energy Solutions. Multiple dual-fuel engines bound for newbuilding powerships. 2025. URL: <https://www.man-es.com/company/press-releases/press-details/2025/03/25/multiple-dual-fuel-engines-bound-for-newbuilding-powerships> (дата звернення: 06.01.2026).
14. Dual fuel technology news. Maritime Propulsion. URL: <https://www.maritimepropulsion.com/news/propulsion/dual-fuel-technology> (дата звернення: 12.12.2025).
15. First Caterpillar methanol dual-fuel engines to deploy in 2026. MarineLink. URL: <https://www.marinelink.com/news/first-caterpillar-methanol-dualfuel-513993> (дата звернення: 11.12.2025).
16. BeHydro hydrogen dual-fuel engine earns LR type approval. MarineLink. URL: <https://www.marinelink.com/news/behydro-hydrogen-dualfuel-engine-earns-lr-509444> (дата звернення: 06.01.2026).
17. World's first ammonia-fuelled PSV ship to operate in 2026, says Wärtsilä. Reuters. 2024. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/worlds-first-ammonia-fuelled-psv-ship-operate-2026-says-wartsila-2024-08-26> (дата звернення: 06.01.2026).
18. Anglo American completes chartered fleet of lower-emission LNG dual-fuelled vessels. LNG Industry. 2024. URL: <https://www.lngindustry.com/small-scale-lng/29022024/anglo-american-completes-chartered-fleet-of-lower-emission-lng-dual-fuelled-vessels> (дата звернення: 06.01.2026).
19. Anglo American loads first LNG dual-fuelled vessel in chartered fleet, cutting emissions by up to 35 %. VesselFinder. 2024. URL: <https://www.vesselfinder.com/news/25485> (дата звернення: 06.01.2026).
20. IEA-AMF Task 60: The progress of advanced marine fuels. Paris : International Energy Agency, 2023. URL: [https://iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF\\_Task\\_60.pdf](https://iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Task_60.pdf) (дата звернення: 06.01.2026).

### **Шпілєвая Т.М. ENERGY EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL FEASIBILITY OF USING DUAL-FUEL ENGINES IN THE MODERN FLEET**

*The use of dual-fuel engines on modern marine vessels is becoming more and more widespread in connection with the strengthening of international environmental requirements aimed at reducing emissions of harmful substances into the atmosphere and reducing the negative impact of shipping on the environment. The use of alternative types of fuel, in particular liquefied or compressed natural gas, in combination with traditional petroleum fuels, allows to significantly reduce emissions of sulfur oxides, nitrogen and carbon dioxide, as well as to increase the overall energy efficiency of ship power plants.*

*In the work, a comprehensive analysis of the energy efficiency and environmental feasibility of using dual-fuel engines on various types of marine vessels is carried out, taking into account the modern trends in the development of shipbuilding and the requirements of international regulatory documents.*

*Special attention is paid to the assessment of the prospects for the introduction of dual-fuel power plants in the commercial fleet, the analysis of their advantages and disadvantages, as well as the consideration of the latest technical solutions aimed at increasing the reliability, safety and environmental friendliness of ship engines. Information is given on modern engineering developments and innovative technologies, the implementation of which is predicted in the near future and which can significantly affect the further development of maritime transport.*

**Keywords:** latest technologies, dual-fuel engines, technological solutions, shipbuilding development, alternative fuels.

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/04>

**Троценко Є.О.**

<https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Нестерко А.Б.**

<https://orcid.org/0000-0001-7488-4214>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Проценко О.Р.**

<https://orcid.org/0000-0002-7719-3336>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Перетятко Ю.В.**

<https://orcid.org/0000-0003-1397-8078>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИКЛИКИ ТА ПІДХОДИ ДО ДІАГНОСТИКИ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ІЗОЛЯЦІЇ СИСТЕМ ВИСОКОЇ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

У статті розглянуто сучасні напрями дослідження часткових розрядів у високовольтній ізоляції за різних режимів прикладеної напруги, зокрема змінної, постійної та комбінованої напруги з пульсаціями. Показано, що перехід електроенергетичних систем до широкого використання передачі електроенергії високої напруги постійного струму (ВНПС), який зараз відбувається в світі, зумовлює необхідність перегляду традиційних підходів до аналізу та діагностики часткових розрядів, сформованих для умов змінного струму. Узагальнено відмінності фізичних механізмів виникнення та розвитку часткових розрядів у діелектриках за дії постійної напруги, пов'язані з накопиченням просторового заряду, поляризаційними ефектами та відсутністю прив'язки розрядних імпульсів до фазового кута. Проаналізовано сучасні методи подання та оброблення сигналів часткових розрядів у системах високої напруги постійного струму, зокрема часові та часово-частотні підходи, які дозволяють підвищити достовірність і завадостійкість вимірювань. Окрему увагу приділено дослідженню часткових розрядів за умов пульсуючої постійної напруги, характерної для перетворювальних трансформаторів та іншого обладнання ВНПС, де накладання постійної і змінної складових істотно впливає на електричні та часові характеристики розрядів. Наведено узагальнення експериментальних результатів, що демонструють залежність інтенсивності та полярності імпульсів часткових розрядів від форми прикладеної напруги. Розглянуто особливості діагностики часткових розрядів у кабельних лініях високої напруги постійного струму, включаючи проблеми низької повторюваності розрядів, ослаблення сигналів та впливу електромагнітних завад. Проаналізовано можливості застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизованої класифікації часткових розрядів і ідентифікації дефектів ізоляції. Показано, що поєднання фізично обґрунтованих моделей і інтелектуальних методів



оброблення даних є перспективним напрямом підвищення ефективності діагностики та надійності високовольтного електрообладнання.

**Ключові слова:** висока напруга постійного струму, висока напруга змінного струму, діагностика ізоляції, пульсації напруги, силові кабелі, часткові розряди.

**Постановка проблеми.** Надійність та довговічність високовольтного електрообладнання значною мірою визначаються станом його ізоляційної системи. Одним із ключових факторів деградації ізоляції є часткові розряди, які протягом десятиліть залишаються предметом інтенсивних теоретичних і експериментальних досліджень. Традиційно основна увага в цій галузі приділялася аналізу умов виникнення, розвитку та діагностики часткових розрядів за дії високої напруги змінного струму (ВНЗС), що було зумовлено домінуванням систем передачі та розподілу електричної енергії змінного струму.

Однак упродовж останніх років дослідження часткових розрядів суттєво вийшли за межі класичної проблематики, пов'язаної виключно з режимами ВНЗС. Активний розвиток і широке впровадження систем передачі електричної енергії високої напруги постійного струму (ВНПС) зумовили появу нових викликів, пов'язаних із виникненням і проявами часткових розрядів в умовах дії постійної напруги [1]. Фізичні механізми формування часткових розрядів при високій напрузі постійного струму (ВНПС) істотно відрізняються від відповідних процесів при змінному струмі, зокрема внаслідок накопичення просторового заряду та прояву поляризаційних ефектів у діелектриках. За таких умов відсутня можливість прив'язки моментів виникнення часткових розрядів до фазового кута прикладеної напруги, що є характерним інструментом аналізу для режимів змінного струму. Це, у свою чергу, суттєво ускладнює інтерпретацію вимірювальних даних [2], знижує ефективність традиційних методів придушення завад і ідентифікації джерел часткових розрядів, а також потребує розроблення спеціалізованих підходів до діагностики ізоляції в умовах ВНПС.

Додатково ускладнює проблему той факт, що в реальних системах ВНПС напруга, як правило, не є ідеально постійною та характеризується наявністю пульсацій, зумовлених роботою перетворювальних пристроїв. У зв'язку з цим у сучасних наукових публікаціях дедалі більше уваги приділяється дослідженню часткових розрядів за комбінованих режимів напруги, що поєднують постійну складову та змінні пульсації [3]. Такі режими за характером формування електричного

поля та динамікою розрядних процесів можуть розглядатися як перехідні між класичними умовами ВНЗС та чистими режимами ВНПС, що зумовлює необхідність їх окремого аналізу з урахуванням специфіки електричних і часових характеристик.

Паралельно зі зміною об'єктів і режимів дослідження відбувається трансформація підходів до оброблення та інтерпретації даних часткових розрядів. В останні роки значна кількість робіт присвячена використанню осцилограм і діаграм, що відображають зв'язок моментів виникнення часткових розрядів із фазовим кутом прикладеної змінної напруги [4], як інформаційної основи для навчання штучних нейронних мереж та інших методів машинного навчання. Такі підходи відкривають нові можливості для підвищення чутливості та достовірності систем діагностики високовольтної ізоляції, а також для автоматизованої ідентифікації типів дефектів за результатами вимірювання часткових розрядів.

Таким чином, сучасні дослідження в галузі часткових розрядів характеризуються розширенням спектра режимів напруги, ускладненням фізичних моделей та активним впровадженням інтелектуальних методів аналізу даних. За цих умов актуальним є узагальнений огляд сучасних напрямів досліджень, який дозволив би систематизувати наявні підходи, окреслити основні тенденції розвитку галузі та виявити наявні наукові й практичні проблеми, що потребують подальшого розв'язання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні наукові дослідження в галузі часткових розрядів у високовольтній ізоляції демонструють чітку тенденцію до поглибленого аналізу різних режимів прикладеної напруги та ускладнення підходів до аналізу експериментальних даних. Традиційно найбільш ґрунтовно вивченими залишаються часткові розряди за дії високої напруги змінного струму, для яких упродовж ХХ століття сформовано розвинену теоретичну базу, стандартизовані методи вимірювання та інтерпретації результатів [5].

Водночас на початку ХХІ століття, у зв'язку з активним впровадженням кабельних систем високої напруги постійного струму, особливо для передачі електричної енергії на великі відстані,

суттєво зросла кількість робіт, присвячених аналізу часткових розрядів за умов ВНПС. У таких дослідженнях відзначається принципова відмінність фізичних механізмів виникнення та розвитку розрядних процесів порівняно з режимами змінного струму, що пов'язано з накопиченням просторового заряду, поляризаційними ефектами в діелектриках і відсутністю прив'язки імпульсів часткових розрядів до фазового кута прикладеної напруги [1, 2]. Це зумовлює неможливість прямого застосування класичних картин розподілу часткових розрядів у фазовій області (Phase-Resolved Partial Discharge або PRPD в англійській літературі) та стимулює пошук альтернативних способів подання й оброблення вимірювальних даних.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із вивченням часткових розрядів за умов пульсуючої постійної напруги, характерної для перетворювального обладнання систем ВНПС. Показано, що накладання постійної складової та змінних пульсацій істотно впливає на інтенсивність, полярність і часову структуру розрядних імпульсів, особливо в паперово-масляній ізоляції трансформаторів і кабельних ліній [3]. Це зумовлює необхідність подальших експериментальних і теоретичних досліджень, спрямованих на уточнення закономірностей часткових розрядів за таких умов.

Паралельно з розвитком фізичних моделей часткових розрядів активно впроваджуються методи інтелектуального аналізу даних. Значна кількість публікацій присвячена використанню фазових, часових і часово-частотних характеристик сигналів часткових розрядів як вхідних даних для алгоритмів машинного навчання та штучних нейронних мереж [4]. Такі підходи спрямовані на автоматизацію класифікації типів дефектів, підвищення завадостійкості вимірювань і покращення достовірності діагностики стану високовольтної ізоляції.

Разом з тим аналіз останніх публікацій свідчить про об'єктивну відсутність універсальних підходів до аналізу часткових розрядів, які б однаково ефективно застосовувалися за різних режимів прикладеної напруги. Це вказує на необхідність узагальнення наявних наукових результатів і визначення перспективних напрямів розвитку методів діагностики часткових розрядів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є проведення комплексного огляду сучасних напрямів дослідження часткових розрядів за різних режимів прикладеної напруги, включаючи змінну, постійну та комбіновану напругу з пульсаціями,

а також аналіз підходів до використання сигналів часткових розрядів у задачах інтелектуальної діагностики та ідентифікації дефектів високовольтної ізоляції.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження часткових розрядів у системах високої напруги змінного струму мають тривалу історію та добре сформовану теоретичну й експериментальну базу. Для умов ВНЗС детально вивчені механізми виникнення часткових розрядів у різних типах ізоляційних дефектів, розроблені стандартизовані методи їх вимірювання та інтерпретації, а також сформовані усталені підходи до діагностики стану високовольтної ізоляції. Водночас пряме перенесення цих підходів на системи високої напруги постійного струму є обмеженим, оскільки відмінності в характері електричного поля, процесах накопичення просторового заряду та у виникненні й розвитку розрядних процесів у часі зумовлюють відмінні фізичні механізми виникнення та розвитку часткових розрядів. Це обумовлює актуальність аналізу спеціалізованих досліджень у галузі ВНПС. Зокрема, у вже згаданій вище роботі [1] виконано експериментальний аналіз характеристик часткових розрядів на зразках кабельної ізоляції з різними дефектами за умов ВНЗС і ВНПС. Автори звертають увагу на те, що в практиці випробувань кабелів постійного струму контроль якості часто здійснюється за змінної напруги, незважаючи на принципові відмінності у фізиці розрядних процесів. Для інтерпретації результатів запропоновано використання картин розподілу часткових розрядів у часовій області (Time-Resolved Partial Discharge або TRPD в англійській літературі) та статистичних параметрів, що дозволяє виявити специфічні особливості розрядної активності за постійної напруги й показати обмеженість прямого перенесення методів змінного струму на оцінювання стану ізоляції в системах ВНПС.

Дійсно, за умов постійної напруги частота джерела дорівнює нулю, тому використання картин розподілу часткових розрядів у фазовій області, які широко застосовуються в системах ВНЗС, є непридатним для систем ВНПС. У зв'язку з цим дослідники зосереджуються на пошуку альтернативних способів подання та інтерпретації результатів вимірювання часткових розрядів в умовах постійного струму. Одним із таких підходів є групування часткових розрядів за їх часово-частотними параметрами (Time-Frequency Map або T-F Map в англійській літературі), яке дає змогу відокремлювати сигнали часткових розрядів від завад [6]. У таких картах розподілу основними параме-

трами є частота першого коливання у спектрі сигналу часткового розряду та тривалість імпульсу часткового розряду. Як показано експериментально в роботах [7, 8], цей підхід до відсіювання шуму, що добре зарекомендував себе в системах змінного струму, є також перспективним для систем постійного струму. Крім того, часово-частотне групування дозволяє автоматично розрізняти сигнали завад і справжні імпульси часткових розрядів на основі статистичного аналізу зареєстрованих сигналів.

У реальних умовах експлуатації обладнання ВНПС дія напруги не обмежується ідеальною постійною складовою, що зумовлює необхідність розгляду часткових розрядів за умов пульсуючої постійної напруги.

Перетворювальний трансформатор (converter transformer в англomовній літературі) є одним із ключових елементів систем передачі електроенергії на високій напрузі постійного струму. Обмотки з боку вентилів у таких трансформаторах працюють в умовах дії складної форми напруги [3, 9], яка поєднує постійну складову, напругу промислової частоти, гармоніки та імпульсні компоненти. Накладання постійної та пульсуючої складових суттєво впливає на стан паперово-масляної ізоляції, що ускладнює оцінку її надійності. Тому дослідження особливостей часткових розрядів за умов пульсуючої постійної напруги є важливим для коректної діагностики технічного стану таких трансформаторів.

Основною причиною виникнення часткових розрядів у трансформаторах є локальні гострі неоднорідності металевих поверхонь. У таких місцях відбувається сильна концентрація електричного поля, що призводить до появи локальних електричних розрядів у трансформаторній оливі. Експериментальні дослідження, проведені в роботі [3], показали, що характеристики цих розрядів в ізоляційній рідині залежать як від постійної, так і від пульсуючої складових напруги. За невеликої амплітуди пульсацій імпульси часткових розрядів мають одиночний характер, тоді як зі збільшенням пульсацій розряди виникають як на стадії підйому, так і на стадії спаду напруги, причому полярність імпульсів у цих випадках протилежна. Крім того, зі зростанням рівня постійної складової напруги спостерігається збільшення як частоти, так і амплітуди часткових розрядів [3].

На підтвердження наведених вище положень у роботі наведено експериментальні осцилограми часткових розрядів, отримані в лабораторних умовах на кафедрі теоретичної електротехніки. На першій осцилограмі (рис. 1) представлено процеси часткових розрядів за умови прикладання нестандартної напруги, що містить постійну складову та пульсації. Видно, що імпульси часткових розрядів виникають як на стадії підйому, так і на стадії спаду напруги, при цьому їх полярність є протилежною, що узгоджується з результатами експериментальних досліджень, наведених у [3]. Друга осцилограма (рис. 2) ілюструє характер

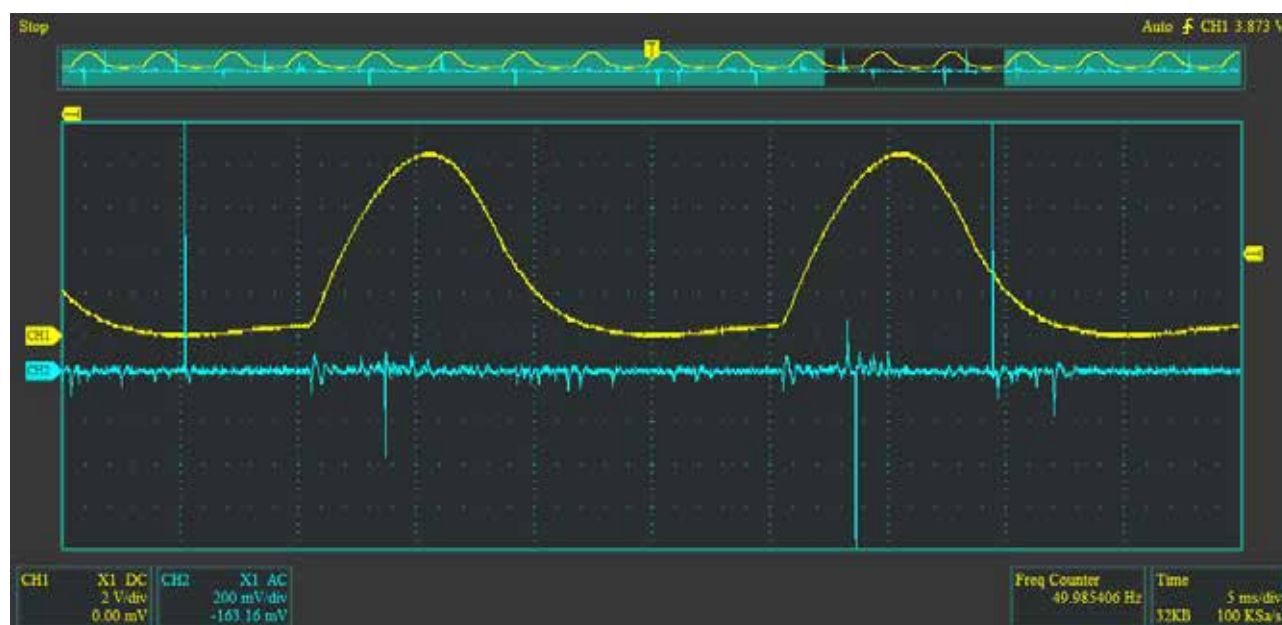


Рис. 1. Осцилограма часткових розрядів при прикладанні нестандартної напруги з постійною складовою та пульсаціями



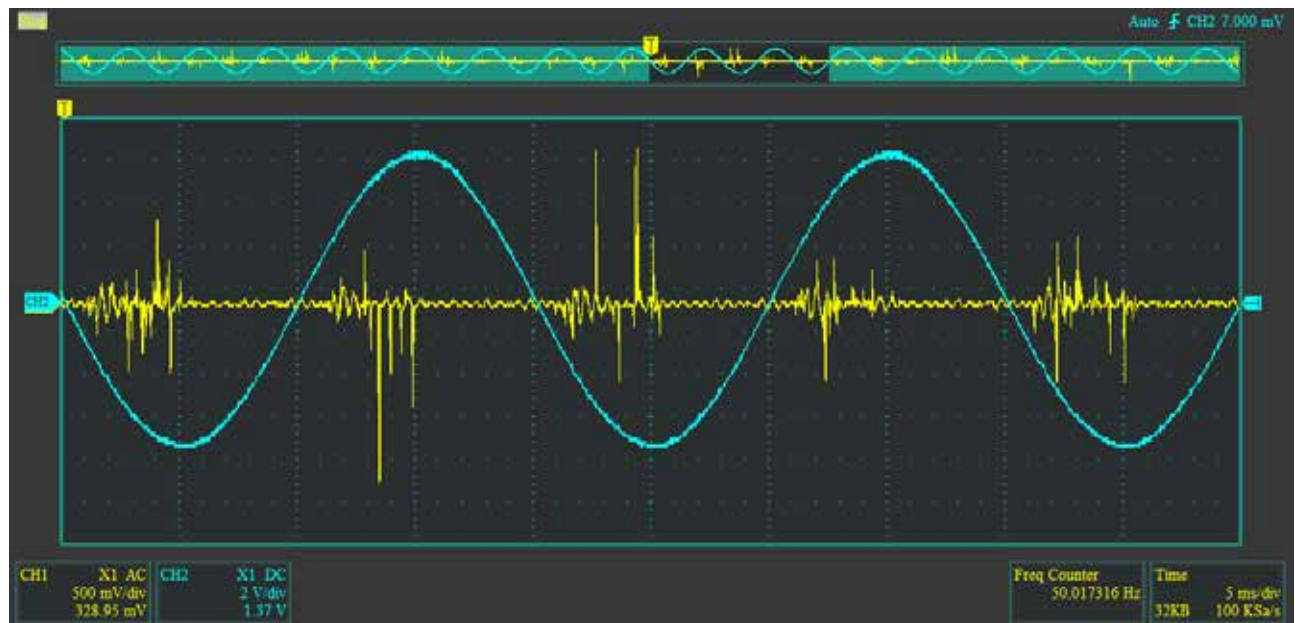


Рис. 2. Осцилограма часткових розрядів при синусоїдальній формі прикладеної напруги

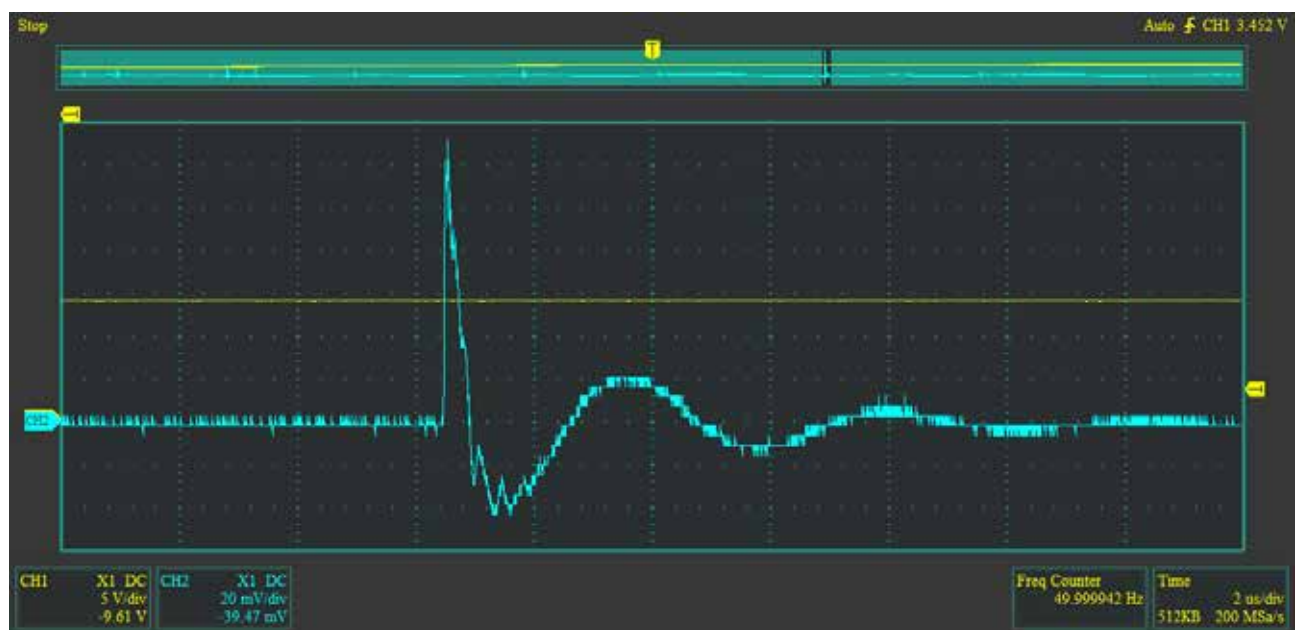


Рис. 3. Осцилограма окремого імпульсу часткового розряду у збільшеному масштабі по осі часу, отримана при прикладанні нестандартної напруги

часткових розрядів при синусоїдальній формі прикладеної напруги: у цьому випадку імпульси часткових розрядів спостерігаються лише на стадії підйому напруги в кожному півперіоді, а після досягнення амплітудного значення напруги їх виникнення припиняється. На третій осцилограмі (рис. 3) у збільшеному часовому масштабі наведено окремий імпульс часткового розряду, отриманий за умов прикладання нестандартної напруги; імпульс має виражену коливальну форму, що свідчить про вплив параметрів вимірюваль-

ної системи на реєстрацію перехідних процесів. Сукупність наведених осцилограм наочно демонструє істотний вплив форми прикладеної напруги на часові та електричні характеристики часткових розрядів.

Часткові розряди у кабелях високої напруги постійного струму є важливим індикатором деградації ізоляції та надійності систем передачі електроенергії. Дослідження показують, що характер часткових розрядів залежить від типу дефекту та умов експлуатації: різні дефекти,



такі як повітряні порожнини, виступи або подряпини, формують специфічні профілі розрядів та різну напругу їх виникнення [10]. Одночасно вимірювання часткових розрядів на з'єднаннях кабелів ВНПС ускладнюються високим опором ізоляції, низькою частотою повторень розрядів (див. рис. 4 нижче) і впливом електромагнітного шуму, що потребує спеціальних методів фільтрації та аналізу імпульсів для коректної інтерпретації даних [11].

Особливо складною є діагностика часткових розрядів у підводних кабелях ВНПС з просоченою паперовою ізоляцією, де сигнали часткових розрядів суттєво послаблюються під час проходження довгою кабельною лінією, а вимірювання ускладнюється шумом перетворювальної станції. Проте, оскільки сигнали часткових розрядів у просочених маслом кабелях мають більшу амплітуду та ширший спектр через особливості деградації їх ізоляції порівняно з кабелями на основі зшитого поліетилену, їх можна виявити при вимірюваннях у низькочастотному діапазоні, завдяки чому стає можливою діагностика навіть віддалених джерел часткових розрядів [12]. Комплексне вивчення цих явищ сприяє кращому розумінню механізмів деградації ізоляції та підтримці надійності кабельних ліній у системах передачі електроенергії постійного струму високої напруги.

У сучасній електротехніці штучний інтелект (ШІ) активно використовується для аналізу часткових розрядів в ізоляції високовольтного облад-

нання, що дозволяє підвищити точність діагностики та прогнозування стану систем. Методи штучних нейронних мереж застосовуються для розпізнавання типів часткових розрядів на основі фазових і амплітудних характеристик сигналів, отриманих від різних сенсорів, що забезпечує ефективну оцінку стану твердої та рідинної ізоляції [13]. Конволюційні нейронні мережі (Convolutional Neural Network або CNN в англійській літературі) та інші алгоритми машинного навчання використовуються для класифікації картин розподілу часткових розрядів у фазовій області у силових кабелях, створюючи бази даних візуальних характеристик, що дозволяє передбачати можливі дефекти та підвищувати надійність експлуатації електрообладнання [4]. Крім того, алгоритми кластеризації та інші методи ШІ застосовуються для аналізу сигналів часткових розрядів у процесі старіння ізоляції, що дає змогу відстежувати розвиток деградаційних процесів під впливом термічних навантажень [14]. Порівняння різних моделей машинного навчання, таких як дерево ухвалення рішень (англ. – decision tree), метод опорних векторів (англ. – support vector machine) та ансамблеві методи машинного навчання (англ. – ensemble learning), демонструє переваги й обмеження кожного підходу для класифікації часткових розрядів і визначення оптимальних стратегій діагностики [15]. Загалом, інтеграція ШІ в системи моніторингу високовольтного обладнання відкриває нові можливості

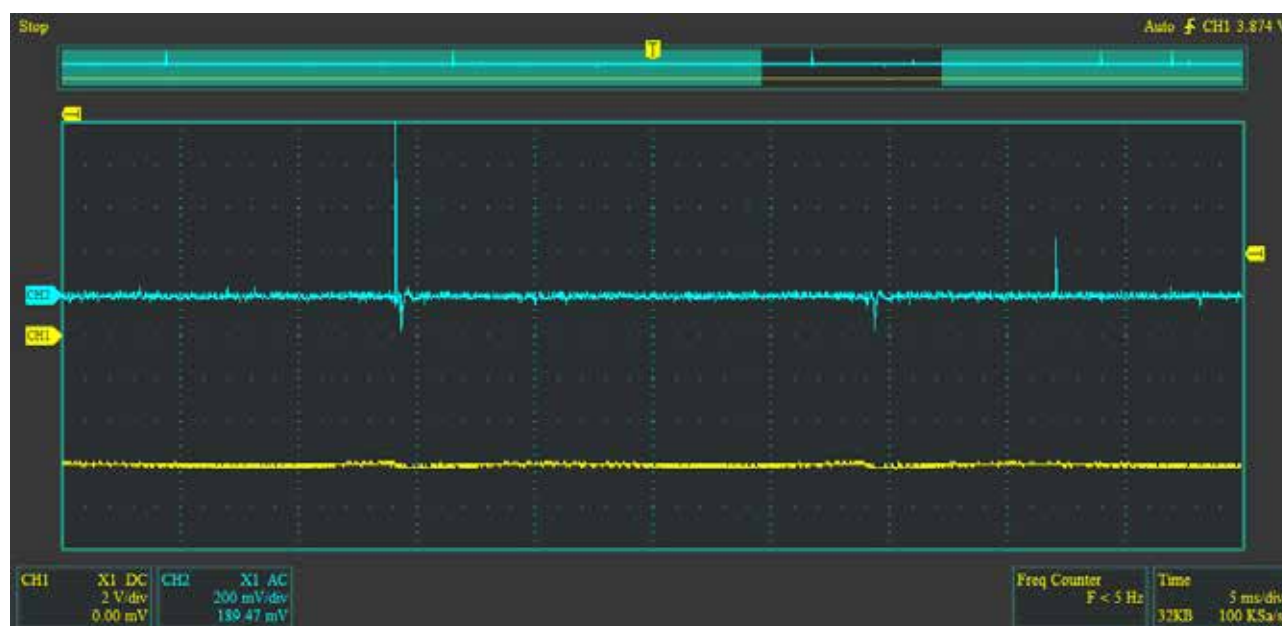


Рис. 4. Прояв поодиноких часткових розрядів у зволоженій ізоляції за умов постійної напруги негативної полярності

для прогнозного обслуговування та підвищення надійності енергетичних систем.

**Висновки.** У роботі узагальнено сучасний стан досліджень часткових розрядів у високовольтній ізоляції за різних режимів прикладеної напруги та показано, що трансформація електроенергетичних систем безпосередньо впливає на методи діагностики ізоляції. Проаналізовані результати свідчать, що усталені підходи, сформовані для умов змінної напруги, лише частково придатні для систем постійного струму, оскільки відмінності у формуванні електричного поля, часовій структурі розрядів і ролі просторового заряду зумовлюють інші прояви деградаційних процесів.

Показано, що в умовах постійної та пульсуючої постійної напруги ключового значення набувають альтернативні способи подання та оброблення даних часткових розрядів, зокрема часові та часово-частотні характеристики імпульсів. Такі підходи дозволяють підвищити завадостійкість

вимірювань і створюють основу для коректної інтерпретації результатів у середовищах із низькою інтенсивністю розрядної активності. Окрему увагу приділено комбінованим режимам напруги, характерним для перетворювального обладнання ВНПС, де взаємодія постійної складової та пульсацій істотно змінює характер часткових розрядів і потребує спеціалізованих моделей аналізу.

Встановлено, що інтеграція методів штучного інтелекту в системи моніторингу часткових розрядів є перспективним напрямом розвитку діагностики, оскільки забезпечує автоматизацію класифікації дефектів та створює передумови для прогнозного обслуговування. Загалом результати огляду підтверджують необхідність подальших комплексних досліджень, спрямованих на узгодження фізичних моделей часткових розрядів із сучасними методами оброблення даних та розроблення універсальних діагностичних підходів для різних режимів високої напруги.

#### Список літератури:

1. Pieroni P., Ciotti G., Caprara A. Comparative analysis of partial discharge measurements for artificial defects under HVAC and HVDC voltage stresses for cable insulating materials. *2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD), Toulouse, France*. 2024. pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICD59037.2024.10613306>
2. Schober B., Schichler U. Separation of partial discharges at DC voltage using PD pulse parameters. *2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Gangneung, Republic of Korea*. 2024. pp. 272–275. DOI: <https://doi.org/10.23919/CMD62064.2024.10766319>
3. Shen J., Li Y., Li S., Li Z., Wu D., Li Z. The partial discharge characteristics of oil-paper needle-plane insulation defects under pulsating DC voltage. *2024 International Conference on HVDC (HVDC), Urumqi, China*. 2024. pp. 55–58. DOI: <https://doi.org/10.1109/HVDC62448.2024.10722893>
4. Kim J., Jeong M., Lee H., Kim Y., Kang H. Artificial intelligence-based recognition and classification of PRPD patterns in power cable. *2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Gangneung, Republic of Korea*. 2024. pp. 612–615. DOI: <https://doi.org/10.23919/CMD62064.2024.10766212>
5. Burada E. -D., Popescu M., Nicoară T., Voicu V., Dumbravă I. Methods for reducing electromagnetic disturbances in partial discharge measurement circuits for insulation assessment of high voltage equipment. *2025 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2025 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Timisoara, Romania*. 2025. pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/OPTIM-ACEMP62776.2025.11075231>
6. Li Y., Han J., Du Y., Jin H. Time-frequency maps for multiple partial discharge sources separation in cable terminations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2023. Vol. 38. No. 3. pp. 2228–2231. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3256127>
7. Montanari G. C., Negri F., Ciani F. Noise rejection and partial discharge identification in HVDC insulation systems. *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, USA*. 2017. pp. 425–428. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIC.2017.8004616>
8. Di Fatta A., Romano P., Imburgia A., Ala G., Rizzo G., Vigni V. L., Albertini M., Bononi S. F. Use of time-frequency map combined with DBSCAN algorithm for separation of partial discharge pulses under DC voltage. *2022 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Denver, CO, USA*. 2022. pp. 427–430. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP55452.2022.9985393>
9. Coutanson F., Zouaghi A., Clerc G., Vollaie C. Impact of harmonic content on partial discharge activity under HVDC. *2024 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Phoenix, AZ, USA*. 2024. pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS55788.2024.11023779>
10. Li B., Zhao S., Zhou Y., Yin Y., Zhao X., Wang Y. Investigation of partial discharge features and inception voltage in cable insulation defects. *2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), Harbin, China*. 2025. pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMPE66159.2025.11122991>

11. Fechner T., Luo Y., Zhou M., Wang H., Xu R., Valtin M. A method for analysis of DC partial discharge measurement data from cable joints. *2025 7th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), Chengdu, China*. 2025. pp. 267–270. DOI: <https://doi.org/10.1109/AEEES64634.2025.11020038>.
12. Won Y., Lee C., Kim J. Analysis of simulated partial discharge waveform and converter noise for the partial discharge diagnosis in HVDC MI submarine cable. *2024 IEEE 14th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Phuket, Thailand*. 2024. pp. 187–190. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPADM61663.2024.10750683>.
13. Lumba L. S., Khayam U., Maulana R. Design of pattern recognition application of partial discharge signals using artificial neural networks. *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, Indonesia*. 2019. pp. 239–243. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEEI47359.2019.8988895>.
14. Giovanna L. D., Guastavino F., Khan I., Raza M. H., Torello E. AI algorithms for post-processing and analysis of partial discharge signals during ageing of insulation. *2025 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Manchester, United Kingdom*. 2025. pp. 805–808. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP61707.2025.11218575>.
15. Boczar T., Zmarzły O., Koziół M. Application of artificial intelligence tools for partial discharge classification. *2025 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Lodz, Poland*. 2025. pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDL63868.2025.11068282>.

**Trotsenko Ye.O., Nesterko A.B., Protsenko O.R., Peretyatko Yu.V. CHALLENGES AND APPROACHES TO DIAGNOSTICS OF PARTIAL DISCHARGES IN INSULATION OF HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT SYSTEMS**

*The article considers modern research directions in the study of partial discharges in high-voltage insulation under various applied voltage regimes, including alternating, direct, and combined voltages with ripples. It is shown that the ongoing global transition of power systems toward the widespread use of high-voltage direct current (HVDC) power transmission necessitates a revision of traditional approaches to the analysis and diagnosis of partial discharges that were originally developed for alternating current conditions. The differences in the physical mechanisms of initiation and development of partial discharges in dielectrics under direct voltage stress are summarized, taking into account space charge accumulation, polarization effects, and the absence of phase-angle reference for discharge pulses. Modern methods for representing and processing partial discharge signals in high-voltage direct current systems are analyzed, in particular time-domain and time-frequency approaches, which make it possible to improve measurement reliability and noise immunity. Special attention is paid to the investigation of partial discharges under pulsating direct voltage conditions, which are characteristic of converter transformers and other HVDC equipment, where the superposition of direct and alternating voltage components significantly affects the electrical and temporal characteristics of discharges. A synthesis of experimental results is presented, demonstrating the dependence of the intensity and polarity of partial discharge pulses on the waveform of the applied voltage. The features of partial discharge diagnostics in high-voltage direct current cable lines are considered, including issues such as low discharge repetition rates, signal attenuation, and the influence of electromagnetic interference. The possibilities of applying artificial intelligence and machine learning methods for automated classification of partial discharges and identification of insulation defects are analyzed. It is shown that the combination of physically based models and intelligent data processing methods is a promising approach for improving the effectiveness of diagnostics and the reliability of high-voltage electrical equipment.*

**Keywords:** high-voltage direct current, high-voltage alternating current, insulation diagnostics, voltage ripples, power cables, partial discharges.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

## ПРИЛАДИ

УДК 621.36

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/05>

**Скакун О.В.**

<https://orcid.org/0000-0003-0101-3332>

Український науково-дослідний інститут спеціальної  
техніки та судових експертиз Служби безпеки України

### ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ В ТРАНСПОРТНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ ТА ШУМОВИХ ПАРАМЕТРІВ У МЕГАПОЛІСАХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ЦЕНТРАХ

У статті представлено оглядово-аналітичне дослідження сучасних засобів вимірювальної техніки, що застосовуються для екологічного контролю та екологічного моніторингу шкідливих викидів у транспортній інфраструктурі, а також визначення шумових параметрів у мегаполісах і промислових центрах. У роботі подано визначення ключових понять, зокрема урбанізація, мегаполіс, промислові центри, екологія, сучасна екологія, урбоекологія, інженерна екологія, екологічний інжиніринг, екологічний контроль та екологічний моніторинг. Проаналізовано актуальні екологічні проблеми, характерні для мегаполісів і промислових центрів України, з урахуванням інтенсивного розвитку транспортних систем, зростання антропогенного навантаження та впливу на якість довкілля. Обґрунтовано необхідність використання сучасних, метрологічно забезпечених засобів вимірювальної техніки для отримання об'єктивної, достовірної та оперативної інформації про стан і рівень забруднення компонентів навколишнього природного середовища, що відповідає вимогам чинних національних та міжнародних стандартів, зокрема ISO/IEC 17025 щодо компетентності лабораторій та EN ISO 14001 щодо систем управління довкіллям. Запропоновано класифікацію засобів вимірювальної техніки, що застосовуються або потенційно можуть бути використані для екологічного контролю, з урахуванням їх метрологічних характеристик, чутливості, точності та відповідності технічним вимогам стандартів ISO/IEC для екологічних вимірювань. Виконано детальний огляд наукових публікацій, нормативних документів і технічних джерел, що регламентують застосування засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю в умовах мегаполісів і промислових центрів. Основну увагу в статті зосереджено на аналізі сучасних портативних засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю, що виготовляються провідними підприємствами країн Європейського співтовариства. Розглянуто функціональні можливості цих засобів, їх метрологічні характеристики, рівень автоматизації та цифрової інтеграції, включно з відповідністю сучасним вимогам до обміну даними (наприклад, стандартам передачі даних для моніторингових систем). Наукова новизна дослідження полягає у комплексному порівнянні технічних характеристик портативних засобів вимірювальної техніки з урахуванням їх здатності забезпечувати екологічний контроль шкідливих викидів у транспортній інфраструктурі та рівнів шумового навантаження від транспортних і промислових джерел. Проведено оцінювання відповідності цих засобів вимірювальної техніки вимогам сучасних метрологічних стандартів і критеріям точності вимірювань, що дозволяє підвищити рівень достовірності даних екологічного моніторингу. Також наведено типи, марки та основні параметри портативних засобів вимірювальної техніки, рекомендованих для практичного застосування в системах екологічного контролю та наукових дослідженнях.

**Ключові слова:** урбанізація, мегаполіс, екологія, сучасна екологія, урбоекологія, інженерна екологія, екологічний інжиніринг, екологічний контроль, екологічний моніторинг, засіб вимірювальної техніки, класифікація засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю, портативний газоаналізатор, портативний шумомір, рекомендований комплект портативних засобів вимірювальної техніки.



**Постановка проблеми.** Урбанізація є одним із найважливіших процесів сучасної цивілізації. Вона полягає у зростанні міст, концентрації населення в урбанізованих територіях та формуванні складних соціально-економічних систем. З одного боку, урбанізація сприяє розвитку інфраструктури, економіки, науки та культури. З іншого – створює потужні екологічні виклики, які потребують системного підходу до управління природокористуванням. Урбанізація (від латинського *urbanos* – міський) – це історичний процес зростання ролі міст у житті суспільства, що виявляється в збільшенні частки міського населення, розширенні міських територій і посиленні впливу міського способу життя на всі сфери суспільного розвитку [1].

Зростання транспорту, використання викопного палива, промислова діяльність призводять до викидів шкідливих газів, зважених частинок, сполук, які забруднюють воду й ґрунти. У міру розширення меж міст втрачаються ліси, болота, сільськогосподарські землі; екосистеми фрагментуються, що зменшує чисельність видів, порушує екологічні функції. Міські середовища (асфальт, бетон, густо забудовані зони) поглинають і утримують тепло, мають менше озеленення, що призводить до підвищення температур у містах порівняно з довколишніми територіями. Це призводить до збільшення енерговитрат (кондиціонування, охолодження) і може погіршувати якість повітря та здоров'я населення. Міста потребують більше води, електроенергії, будівельних матеріалів; також великі об'єми побутових і промислових відходів. Це призводить до забруднення середовища.

Внаслідок урбанізації з'явилося поняття мегаполісу. Мегаполіс – це величезна міська агломерація, яка є ключовим економічним, політичним і культурним центром, що включає одне або декілька великих міст із численними передмістями та населеними пунктами в яких розвиваються різні галузі промисловості. Це призводить до концентрації промислових підприємств у певних містах, які й стають промисловими центрами.

У міру зростання масштабів транспортної інфраструктури та концентрації промислових об'єктів в мегаполісах та промислових центрах зростає антропогенне навантаження на довкілля. Автотранспорт, залізниця, авіатранспорт і промислові викиди формують значну частку шкідливих речовин у повітрі. Одночасно транспорт і промисловість – основні джерела міського шуму. Обидва фактори негативно впливають на здоров'я населення та екологію. Екологія – це пізнання

економіки природи, одночасне дослідження всіх взаємовідносин живого з органічними і неорганічними компонентами середовища [2]. З часів Е. Геккеля поняття «екологія» доповнювалося, змінювалося, його значення то розширювалося, то звужувалося. Це пояснюється тим, що екологічні проблеми в житті людства вийшли на перший план і їх розв'язанням почали займатися вчені практично всіх наукових напрямів. Екологія перетворилася на комплекс фундаментальних і прикладних дисциплін, головним завданням яких стало збереження життя і цивілізації на планеті, на систему наук про Землю та її оточення. Сучасна екологія – це одна з головних фундаментальних комплексних наук про виживання на планеті Земля, завданням якої є пізнання законів розвитку і функціонування біосфери як цілісної системи під впливом природної і, головне, антропогенної діяльності, а також про визначення шляхів і засобів еколого-економічно збалансованого співіснування техносфери і біосфери. Одним із напрямків сучасної екології є урбоекологія. Урбоекологія досліджує процеси урбанізованих і промислових територій (найбільш техногенно навантажених), які формують екологічні умови та особливості функціонування екосистеми під впливом енергетики, транспорту, будівництва, різних галузей промисловості [3]. Вивченням взаємодії промислового виробництва з навколишнім природним середовищем і забезпеченням створення і раціонального функціонування природно-промислових систем різного рангу займається інженерна екологія або «Екологічний інжиніринг». Мета екологічного інжиніринга або еколого-інженерної діяльності – це техніко-економічне обґрунтування комплексу заходів щодо екологічної модернізації виробництва з проведенням попередніх технологічних досліджень на пілотному устаткуванні; передінвестиційна оцінка впливу проектних пропозицій на навколишнє природне середовище; оцінка екологічних ризиків у складі проектування організаційних схем [4]. Екологічний контроль та екологічний моніторинг виступають ключовими інструментами забезпечення екологічної безпеки. Вони дають змогу оцінювати рівень забруднення повітря та шумового навантаження, виявляти перевищення гранично допустимих норм, а також прогнозувати ризики для довкілля і людини. Застосування сучасних вимірювальних приладів і систем моніторингу забезпечує отримання достовірних даних, що є основою для прийняття управлінських рішень у сфері екологічної політики міст і промислових регіонів.

Особливої актуальності набуває дослідження методів та засобів контролю за шкідливими викидами і шумовими параметрами, що дозволяють формувати комплексну систему моніторингу для зменшення негативного впливу на довкілля та підвищення якості життя населення.

Ця стаття рекомендує приклади вибору сучасних ЗВТ для екологічного контролю.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Актуальні проблемні питання екологічного контролю у мегаполісах та промислових центрах досліджували такі вітчизняні науковці як В.П. Кучерявий [5], М.М. Радомська [6], В.М. Ісаєнко., К.О. Бабікова, Т.В. Михалевська, Л.В. Береза-Кіндзерська [7], Ю.О. Полукаров, Н.А. Праховнік, О.В. Землянська [8], С.В. Берзіна, В.Є. Борецько, Г.С. Бузан [9], М.М. Орфанова [10] та інші.

Значним та вагомим є також внесок зарубіжних вчених. Таких як: Рейчел Карсон (засновницю сучасного екологічного руху), Гарольда Варнке, Луїзи Т. Моліни, Мішеля Гаусса [11], Філіппа Е. Карпа [12] та інших.

В працях вищезазначених дослідників не достатньо розглянуто обґрунтування та вибір сучасних ЗВТ для екологічного контролю, майже не надано перелік рекомендацій щодо їх застосування.

**Постановка завдання.** Метою статті є ґрунтовний аналіз технічних параметрів та результатів апробацій доступних в Україні певних моделей ЗВТ, які можуть використовуватися для вирішення задач екологічного контролю у мегаполісах та промислових центрах, надання рекомендацій щодо вибору та оптимального застосування портативних сучасних ЗВТ для контролю шкідливих викидів в транспортній інфраструктурі та рівня шумових параметрів від транспортних та промислових джерел.

**Виклад основного матеріалу.** Екологічний контроль і моніторинг не просто дають дані про стан довкілля – вони безпосередньо впливають на якість навколишнього середовища через управлінські, правові й технологічні рішення. Моніторинг надає об'єктивні дані про рівень забруднення повітря, води, ґрунтів, шуму, радіації. Ця інформація стає основою для екологічної політики, міжнародних звітів, планування міст і транспортної інфраструктури. Екологічний контроль виявляє порушення норм (перевищення гранично допустимих норм, незаконні викиди), що веде до штрафів, припинення діяльності, модернізації підприємств. Результати моніторингу спонукають до впровадження сучасних технологій (фільтри на

заводах, електротранспорт у містах, шумозахисні екрани вздовж магістралей). Екологічний контроль і моніторинг не змінюють довкілля безпосередньо, але вони: виявляють проблеми; стимулюють впровадження природоохоронних заходів; забезпечують правове регулювання; формують екологічну свідомість суспільства.

Щоб отримати повну й достовірну інформацію про стан та рівень забруднення навколишнього середовища, потрібна цілісна система спостереження та аналізу, яка складається з таких взаємопов'язаних елементів як: джерела інформації (польові спостереження, автоматизовані станції моніторингу, супутникові та аерофотознімки, біоіндикація); засоби вимірювальної техніки (газоаналізатори та пілометри, мультипараметрові зонди, ґрунтові аналізатори, шумоміри та вібрографи, дозиметри та гамма-спектрометри); методи збору й обробки даних (інструментальні вимірювання, лабораторний аналіз, геоінформаційні системи, математичне моделювання); інформаційні системи та нормативи (державні системи моніторингу довкілля, міжнародні бази даних, нормативи та стандарти); організаційна складова (наукові установи та лабораторії, державні екологічні інспекції, громадські організації та волонтери) [6].

Для контролю шкідливих викидів в транспортній інфраструктурі та шумових параметрів у мегаполісах і промислових центрах оптимально використовувати комплекс методів: інструментальні (газоаналізатори, шумоміри, пілометри); дистанційні (лідар, супутники); біоіндикаційні; геоінформаційні системи та математичне моделювання.

#### **Контроль шкідливих викидів в транспортній інфраструктурі**

Негативний вплив викидів автомобільного транспорту в забрудненні навколишнього середовища надзвичайно істотний. Основні складові цього явища наступні: 1) основна кількість різноманітного автотранспорту сконцентрована в місцях із високою щільністю населення – мегаполісах та промислових центрах; 2) шкідливі викиди від автомобілів продукуються в приземних (найнижчих) шарах атмосфери, тобто там, де відбувається основна життєдіяльність людини і де ефективні умови для розсіювання цих викидів є найгіршими; 3) відпрацьовані гази двигунів автотранспорту містять в своєму складі токсичні компоненти з високою концентрацією (вони і є основними забруднювачами атмосфери). Від десяти діб до шести місяців такі



шкідливі речовини можуть зберігатися в приземній атмосфері.

Для скорочення негативного впливу шкідливих викидів автомобільного транспорту на атмосферне повітря необхідно розвивати приладовий контроль екологічних параметрів автотранспортних засобів (автомобілі, автобуси, мотоцикли, скутери, мопеди); сільськогосподарської техніки (трактори, комбайни); дорожніх і будівельних машин (екскаватори, крани, катки), що експлуатуються, і також всього існуючого автотранспортного виробництва. Зазначений контроль *відпрацьованих газів автотранспортних засобів (інше визначення – пересувних джерел) необхідно проводити на відповідність* ДСТУ 4276-2004 «Норми і методи вимірювання димності відпрацьованих газів автомобілів з дизелями або газодизелями» та ДСТУ 4277-2004 «Норми і методи вимірювань вмісту оксиду вуглецю та вуглеводнів у відпрацьованих газах автомобілів з двигунами, що працюють на бензині або газовому паливі». Виконавець та періодичність такого контролю визначені *Статтею 29 Закону України «Про охорону атмосферного повітря» та Статтею 3 Закону України «Про метрологію і метрологічну діяльність»* [13].

Для контролю застосовуються три типи розміри ЗВТ: стаціонарні, переносні та портативні. Для контролю шкідливих викидів відпрацьованих газів автотранспортних засобів рекомендується використовувати газоаналізатори німецької компанії Dräger Safety. Наприклад, персональний одноканальний газоаналізатор Dräger Pac 6500 (Рис. 1) здатний швидко і точно визначати такі гази, як  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$  або  $\text{O}_2$  [14]. Датчик для визначення  $\text{CO}$  вимірює концентрації від 0 до 2000 ppm, а сенсор для визначення  $\text{H}_2\text{S}$  – концентрації від 0 до 100 ppm. Чутливі сенсори мають малий час відгуку, а потужний батарейний акумулятор надійно тримає заряд протягом тривалого часу. Мембранний фільтр захищає сенсори від зовнішніх забруднень, таких як пил або рідини. Дисплей Dräger Pac 6500 окрім концентрації газу показує таку додаткову інформацію: одиниці вимірювання концентрації, заряд батареї. Яскраве підсвічування дозволяє чітко бачити в темряві всі дані. При визначенні Dräger Pac 6500 небезпечної концентрації газу, прилад включає звукову, світлову і вібро сигналізацію. Яскраві світлодіоди у верхній та нижній частинах газоаналізатора легко помітні. Рівень гучності звукового сигналу досягає 90 дБ. Дисплей приладу показує максимальну поточну концен-



Рис. 1. Газоаналізатор Dräger Pac 6500

трацію в будь-який час виконання вимірювань. Існує функція індикації колишніх сигналів тривоги, навіть після їх підтвердження. Газоаналізатор Dräger Pac 6500 поставляється з довговічними сенсорами DrägerSensor і потужною батареєю. Протягом двох років (від початку експлуатації) він не потребує технічного обслуговування, заміни сенсорів або батареї.

#### **Контроль рівня шумових параметрів від транспортних та промислових джерел**

Надмірний або досить значний рівень шуму, відповідно до чинного законодавства України, вважається забрудненням. Тому, його рівень підлягає обмеженню, як і інші фактори забруднення навколишнього середовища. Стандарти шуму визначені досить суворі.

Шумовий вплив на людину – одна з найбільш актуальних екологічних проблем сучасного життя, оскільки з розвитком цивілізації він зростає з часом все більше. Практично майже вся діяльність людини або робота технічних пристроїв супроводжується випромінюванням шуму. Таким чином, люди піддаються впливу шуму як в побутових умовах так і в процесі виробничої діяльності.

**Шум** – це набір звуків різної інтенсивності і частоти, що знаходяться в хаотичному, безладному поєднанні. Розрізняють такі види шуму: аеродинамічний (виникає при русі повітря, газів); механічний (виникає під час тертя, ударів, коливань окремих деталей, обладнання загалом); гідравлічний (виникає при русі води та інших рідин). За часом шум може бути постійним і непостійним. Непостійний поділяється на коливний, переривчастий та імпульсний [15].

Науковці різних країн вже досить давно визначились щодо негативного впливу шуму на здоров'я людини. Все більшого поширення нині набуває термін «шумове забруднення» – це форма фізичного забруднення, яке виникає в результаті збільшення рівня шуму понад природний, викликає у людини за короткочасного впливу – неспокій, а за тривалого – погіршення здоров'я [15].

Інтенсивність шумового забруднення (шумового тиску) вимірюється в децибелах (дБ). Шуми інтенсивністю 30-80 дБ неносять шкоди людському організму. Водночас шуми інтенсивністю більше 80 дБ призводять до фізіологічних і психологічних негативних наслідків на нервову систему, сон, емоції, працездатність [16]. Згідно із санітарними нормами рівень шуму біля житлових будинків у денний час не повинен перевищувати 55 дБ, а вночі (з 23.00 до 7.00 години ранку) – 45 дБ, у квартирах – 30–40 дБ. Шум в діапазоні 130–160 дБ становить серйозну небезпеку для людського організму (контузія, біль, шок, травми). Починаючи з 160 дБ – у людини може статися розрив барабаних перетинки і легень, а 200 дБ – призводять до смерті.

У Європейському союзі вимірювання шуму проводиться за міжнародним стандартом ІЕС 61672-1. У деяких європейських країнах діють свої національні стандарти, проте всі вони підпорядковані вимогам стандартів Міжнародної електротехнічної комісії (ІЕС). В США застосовують стандарти ANSI (зокрема ANSI S1.4). В Україні діє ДСТУ 2325-93 «Шум. Терміни та визначення».

Рівень шуму вимірюють шумомірами. Шумоміри – важливі та незамінні ЗВТ для об'єктивного вимірювання рівня шуму у виробничих цехах, на транспорті, в офісних та житлових приміщеннях. Шумоміри стають у нагоді спеціалістам з техніки безпеки та звукового навантаження в різних середовищах. Важлива сфера застосування таких приладів – екологічний контроль та моніторинг рівня шумів в населених пунктах, поблизу великих підприємств, аеропортів, автовокзалів, автомагістралей тощо.

Шумомір складається з ненаправленого мікрофона, підсилювача, коригуючих фільтрів, детектора, інтегратора (для інтегруючих шумомірів) та індикатора. Залежно від точності вимірювань шумоміри поділяють на класи – 0, 1, 2 і 3. Чим вищий клас точності шумоміра, тим вища його вартість. Для орієнтовних вимірювань рівня шуму достатньо шумоміра 3-го класу, для вимірювань за нормами ДСТУ потрібен шумомір 1-го або 2-го класу. На ринку України доступний досить великий вибір портативних шумомірів. Увагу заслуговує шумомір HD2010UC виробництва компанії Delta Ohm (Італія) (Рис. 2). DeltaOhm HD2010UC – це інтегруючий портативний прилад для проведення статистичного аналізу шумового забруднення. ЗВТ характеризується максимально можливим комплектом функцій, простий в експлуатації, має відносно невисоку вартість. Осо-



Рис. 2. Шумомір DeltaOhm HD2010UC

бливість шумоміра DeltaOhm HD2010UC – можливість його налагодження для конкретних задач користувача і використання (при необхідності) опційних можливостей, наприклад, «Advanced Data Logger» – додаток, що дозволяє виконувати автоматичну реєстрацію даних. Користувач самостійно може оновити прошивку приладу за допомогою програми NoiseStudio, що входить в комплект поставки. Шумомір DeltaOhm HD2010UC оснащений графічним екраном із підсвічуванням. DeltaOhm HD2010UC дозволяє вимірювати рівень звукового тиску за допомогою програмування трьох параметрів із можливістю вільного вибору ширини частотної смуги та часових констант. Прилад має досить широке застосування – від вимірювання шуму на робочих місцях, оцінки стану навколишнього середовища, визначення імпульсних шумів до використання приладу в межах ідентифікаційних заходів. Це дозволяє усунути або зменшити джерела надмірного шуму до рівня, дозволеного вимогами стандартів, і забезпечити найкращі акустичні умови [17].

Отже, при контролюванні шумових параметрів в мегаполісах та промислових центрах, необхідно виконувати наступне: 1) вимірювання та прогнозування шуму на будівельних майданчиках; 2) вимірювання та прогнозування шуму промислових підприємств; 3) вимірювання та прогнозування шуму в житлових будинках; 4) вимірювання та прогнозування шуму в офісних приміщеннях; 5) вимірювання шуму від автомобільних доріг, залізничних і трамвайних колій, від тролейбусних ліній, від аеропортів; 6) вимірювання шуму від різних типів машин, механізмів і пристроїв; 7) розробка компенсаційних заходів щодо зменшення впливу акустичного навантаження [17]. Для виконання перелічених заходів потрібно технічно грамотно вибирати та використовувати шумоміри.

**Висновки.** Урбанізація є невідворотним процесом розвитку людства, однак її еколо-



Комплект портативних приладів

| № з/п | Тип моделі та назва приладу                     | Виробник                     | Призначення                                              |
|-------|-------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1     | Dräger Pac 6500<br>Одноканальний газоаналізатор | Dräger Safety<br>(Німеччина) | Контроль шкідливих викидів в транспортній інфраструктурі |
| 2     | HD 2110 UC<br>Шумомір                           | Delta Ohm<br>(Італія)        | Контроль шумових параметрів                              |

гічні наслідки мають бути об'єктом постійного моніторингу та управління. Збалансована політика розвитку міст, екологічний контроль за транспортною інфраструктурою, впровадження «зелених» технологій можуть суттєво знизити негативний вплив урбанізації на довкілля. Для

забезпечення оперативного екологічного контролю шкідливих викидів в транспортній інфраструктурі та шумових параметрів у мегаполісах і промислових центрах рекомендується використовувати комплект портативних приладів (Таблиця 1).

#### Список літератури:

1. Назаренко В.А. Урбанізація в сучасних умовах: економічний аспект на прикладі міста Києва. Журнал «Землеустрій, кадастр і моніторинг земель». 2019. № 3. 69–80 с. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemleustriy\\_2019\\_3\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemleustriy_2019_3_10) (дата звернення: 01.12.2025).
2. Аніщенко В.О. Основи екології: навчальний посібник. Київ, 2011. 148 с.
3. Білявський Г.О., Бутченко Л.І. Основи екології: теорія та практикум: навчальний посібник для студентів вищих закладів. Київ, 2004. 368 с.
4. Жигуц Ю.Ю., Цигика В.В. Інженерна екологія (для студентів технічних спеціальностей). Ужгород, 2020. 204 с.
5. Кучерявий В.П. Урбоекологія: підручник. Львів, 2025. 460 с. URL: <http://ns2000.com.ua> (дата звернення: 11.12.2025).
6. Радомська М.М., Бовсуновський Є.О. Навчально-методичний комплекс з дисципліни «Урбоекологія». Київ, 2022. URL: <http://er.kai.edu.ua> (дата звернення: 11.12.2025).
7. Ісаєнко В.М., Бабікова К.О., Михалевська Т.В., Береза-Кіндзерська Л.В. Моделювання і прогнозування рівня забрудненості атмосферного повітря у зонах ризику мегаполісів. 2019. *Екологічна безпека*. № 2 (28). Розробка та експлуатація систем екологічного моніторингу. 24–30 с. URL: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/44373> (дата звернення: 12.12.2025).
8. Екологічна безпека та цивільний захист: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 121-«Інженерія програмного забезпечення» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю.О. Полукаров, Н.А. Праховник, О.В. Землянська. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 184 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41133> (дата звернення: 11.12.2025).
9. Берзіна С.В. Громадський екологічний контроль: посібник для громадських інспекторів з охорони довкілля. Київ, 2017. 150 с.
10. Орфанова М.М. Нормування антропогенного навантаження на природне середовище: Практикум. Івано-Франківськ, 2021. 23 с.
11. Alexander Baklanov, Luisa T. Molina, Michael Gauss. Megacities. Air quality and climate № 126. 2016. 235–249 p.
12. Philip E. Karp. How to manage urban expansion in mega-metropolitan areas 2017. URL: <http://blogs.worldbank.org/sustainablecities/how-manage-urban-expansion-mega-metropolitan-areas> (дата звернення: 16.11.2025).
13. Коломієць С.В. Підвищення рівня екологічної безпеки автотранспортних засобів. Дисертація. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Національний транспортний університет. Національний авіаційний університет. Київ, 2019, 164 с.
14. Портативний газоаналізатор Dräger Pac 6500. URL: <https://xn--90anfscfbdt.com.ua/ua/p1089828641-portativnyj-gazoanalizator-drager.html> (дата звернення: 20.11.2025).
15. Грибан В. Г., Негодченко О.В. Охорона праці. Київ, 2009. 280 с.
16. ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 Національний стандарт України. Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму сільбищних територій. Київ, 2014. 46 с.
17. Електронний ресурс фірми «7 вольт». URL: <https://www.simvolt.ua> (дата звернення: 30.11.2025).

**Skakun O.V. ENVIRONMENTAL CONTROL AND ENVIRONMENTAL MONITORING OF HARMFUL EMISSIONS IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE AND NOISE PARAMETERS IN MEGACITIES AND INDUSTRIAL CENTERS**

*The article presents a review and analytical study of modern measuring equipment used for environmental control and environmental monitoring of harmful emissions in transport infrastructure, as well as the determination of noise parameters in megacities and industrial centers. The paper provides definitions of key concepts, in particular urbanization, megacities, industrial centers, ecology, modern ecology, urban ecology, engineering ecology, environmental engineering, environmental control and environmental monitoring. The current environmental problems characteristic of megacities and industrial centers of Ukraine are analyzed, taking into account the intensive development of transport systems, the growth of anthropogenic load and the impact on environmental quality. The necessity of using modern, metrologically equipped measuring instruments to obtain objective, reliable and operational information on the state and level of pollution of environmental components is substantiated, which meets the requirements of current national and international standards, in particular ISO/IEC 17025 on laboratory competence and EN ISO 14001 on environmental management systems. A classification of measuring instruments used or potentially used for environmental control is proposed, taking into account their metrological characteristics, sensitivity, accuracy and compliance with the technical requirements of ISO/IEC standards for environmental measurements. A detailed review of scientific publications, regulatory documents and technical sources regulating the use of measuring instruments for environmental control in megacities and industrial centers is carried out. The main attention in the article is focused on the analysis of modern portable measuring instruments for environmental control manufactured by leading enterprises of the European Community. The functional capabilities of these devices, their metrological characteristics, the level of automation and digital integration, including compliance with modern data exchange requirements (for example, data transmission standards for monitoring systems) are considered. The scientific novelty of the study lies in the comprehensive comparison of the technical characteristics of portable measuring devices, taking into account their ability to provide environmental control of harmful emissions in transport infrastructure and noise pollution levels from transport and industrial sources. The compliance of these measuring devices with the requirements of modern metrological standards and measurement accuracy criteria is assessed, which allows to increase the level of reliability of environmental monitoring data. The types, brands and main parameters of portable measuring devices recommended for practical use in environmental control systems and scientific research are also given.*

**Keywords:** urbanization, megalopolis, ecology, modern ecology, urban ecology, engineering ecology, environmental engineering, environmental control, environmental monitoring, measuring instrument, classification of measuring instruments for environmental control, portable gas analyzer, portable sound level meter, recommended set of portable measuring instruments.

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

# РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 004.622: 517.927

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/06>**Бараннік В.В.**<https://orcid.org/0000-0002-2848-4524>

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Прокопенко Р.О.**<https://orcid.org/0009-0006-0789-9073>

Харківський національний університет радіоелектроніки

## МЕТОД СТЕГANOГРАФІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ПОЗИЦІЙНОМУ ПРОСТОРІ

В статті обґрунтовується те, що в умовах активної протидії з боку протиборчої сторони виникають складнощі в процесі забезпечення безпеки відеоінформації, яка передається з використанням інформаційно-комунікаційних систем з бортового комплексу. В основі наукової проблематики тут кроїться суперечність між вимогами до зменшення бітового об'єму та забезпеченням конфіденційності та цілісності інформації. В статті показано, що одним з підходів для захисту відеоінформації є методи стеганографії. Відмінна перевага тут стосується можливості захисту інформації шляхом приховування у відео-контейнерах без руйнації його змісту. Базовим методом, який має найбільш поширене практичне застосування та апробацію є метод вбудовування до найменш значимого біту двійкового синтаксису контейнеру. Метод LSB відноситься до класу методів безпосередньої заміни. В статті показується, що одним з перспективних є розвиток методів вбудовування інформації з використанням механізму LSB у квантованому спектральному просторі. В цьому разі інформація приховується в найменш значимі бітові групи коефіцієнтів дискретного косинусного перетворення. Даний варіант приховування інформації методом LSB має більше практичне застосування. Однак для нього притаманний дисбаланс між: об'ємом інформації, що вбудовується (стеганографічна ємність); значенням коефіцієнта стиснення сегментів-ВКН. Такий дисбаланс зумовлено тим, що за рахунок вбудовування інформації змінюються або частково руйнуються вагомості особливості, які використовуються в процесі подальшого стиснення. Надається обґрунтування того, що для подальшого розвитку методів стеганографії пропонується використовувати підходи, які базуються на встановленні функціональних залежностей в області виявлення структурних ознак. Розробляється метод стеганографічних перетворень в структурному просторі на основі модифікації П-базису за умов виявлення відповідних ознак в спектрально-квантованому описі відеосегментів. Доводиться перевага створеного методу за кількістю вбудованої інформації в умовах заданого рівня маскування факту наявності прихованої інформації.

**Ключові слова:** роботизовані комплексні, контейнери візуального походження, скорочення надмірності, структурні залежності, позиційний базис.

**Постановка проблеми.** Забезпечення безпеки інформаційних ресурсів складає важливу проблематику. Особливо це стосується умов активної протидії з боку протиборчої сторони [1, с. 4]. Водночас в процесі вирішення таких питань виникають складнощі. Характерним прикладом тут є доставка відеоінформації з бор-

тових комплексів. В цьому випадку існує множина вразливих факторів. До них слід віднести наступні [2, с. 22]:

- обмеженість енергетичних ресурсів бортових комплексів;
- недостатня щодо сучасних вимог швидкість передачі даних з бортових комплексів;

– існування ризиків перехвату інформаційного потоку або управління бортовим комплексом [3, с. 15].

За означеними обставинами з одного боку підвищується вимоги щодо захисту інформації. З іншого боку підвищуються вимоги відносно зменшення бітового об'єму відеоінформаційного потоку. Одночасне забезпечення таких вимог в умовах обробки та передачі інформації з застосуванням бортових комплексів є нетривіальною науково-прикладною задачею [4, с. 4]. Отже забезпечення рівня захисту інформації в умовах її своєчасної передачі з використанням бортових комплексів є актуальною *науково-прикладною задачею*.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для захисту інформації щодо несанкціонованого доступу використовують два підходи [5, с. 10].

Перший – використовуються методи криптографічного шифрування. Такий варіант пов'язано зі збільшенням об'єму бітового опису відеоданих. Причиною чого є додаткова формування бітового об'єму для передачі перевірочних (контрольних) послідовностей в процесі реалізації завадостійкого кодування [6, с. 3].

Другий підхід стосується використання методів стеганографії. Відмінна перевага тут стосується можливості захисту інформації шляхом приховування у відео-контейнерах [7, с. 2] без руйнації його змісту. Відповідно виникає потреба щодо практичного застосування даного підходу в комплексних системах для підвищення рівня конфіденційності інформації.

Базовим методом, який має найбільш поширене практичне застосування та апробацію є метод вбудовування до найменш значимого біту двійкового синтаксису контейнеру [8, с. 3]. Англomовне позначення такого методу – LSB. Метод LSB відноситься до класу методів безпосередньої заміни.

Одним з перспективних є розвиток методів вбудовування інформації з використанням механізму LSB у квантованому спектральному просторі. В цьому разі інформація приховується в найменш значимі бітові групи коефіцієнтів дискретного косинусного перетворення [9, с. 5].

Даний варіант приховування інформації методом LSB має більше практичне застосування. Однак для нього притаманний дисбаланс між: об'ємом інформації, що вбудовується (стеганографічна ємність); значенням коефіцієнта стиснення сегментів-ВКН [10, с. 4].

Такий дисбаланс зумовлено тим, що за рахунок вбудовування інформації змінюються або част-

ково руйнуються вагомні особливості, які використовуються в процесі подальшого стиснення. Наприклад, можуть руйнуватися: серії з елементів матриці ДКП, які мають нульові значення; статистичні залежності в напрямку вирівнювання законів розподілу. Звідси втрачається ефективність процесів усунення статистичної та структурної надмірності. Стандартизовано для існуючих підходів обмеження такого дисбалансу досягається шляхом скорочення об'єму інформації, яка приховується.

Основним недоліком тут є залежність кількості вбудованої інформації від рівня маскування факту такого приховування [11, с. 3].

**Постановка завдання.** Для подальшого розвитку методів стеганографії пропонується використовувати підходи, які базуються на встановленні функціональних залежностей в області виявлення структурних ознак [12, с. 5]. Варіантом тут може бути використання в якості базового підходу методу модифікацій у позиційному базисі (П-базисі). Отже *мета статті* стосується розробки методу стеганографічних перетворень в структурному просторі трансформованих сегментів-контейнерів.

**Виклад основного матеріалу.** Стеганографічна система шляхом перетворень в НРВ базисі включає наступні складові (пряме та зворотне перетворення):

**І. Пряме перетворення.** Стеганографічне вбудовування інформації на основі функціональних перетворень з модифікацією адаптивного позиційного базису. Такі перетворення застосовуються до окремих адаптивних позиційних чисел або до всього ВП-контейнеру. Блок-схема етапів стеганографічного вбудовування представлена на рис 1.

Вбудовування інформаційного біту  $\lambda_{\xi}$  згідно особливостей функціональних перетворень в П-базисі. Тут виконуються такі дії:

– здійснення модифікації ОПЧ  $r_{i,j}$  в межах допустимої зміни за умов зменшення впливу на рівень стиснення (зменшення кількості  $H_j$  штучної надмірності, тобто  $\eta=1$ );

– вбудовування біту  $\lambda_{\xi}$  повідомлення  $\Lambda$  шляхом використання механізму модифікації ОПЧ  $r_{i,j}$  за умов виключення втрат цілісності та зменшення впливу на рівень стиснення. Для цього застосовується правило:

$$r'_{i,j} = \min(\max\{S(\alpha;\beta)_j\}; \delta_i) + \theta | \theta = 1 + \text{sign}(\lambda_{\xi}).$$

Після чого організується знаходження значення коду  $N'_j$  за обліком модифікованого значення ОПЧ  $r'_{i,j}$  в П-базисі. Тут відбувається стис-

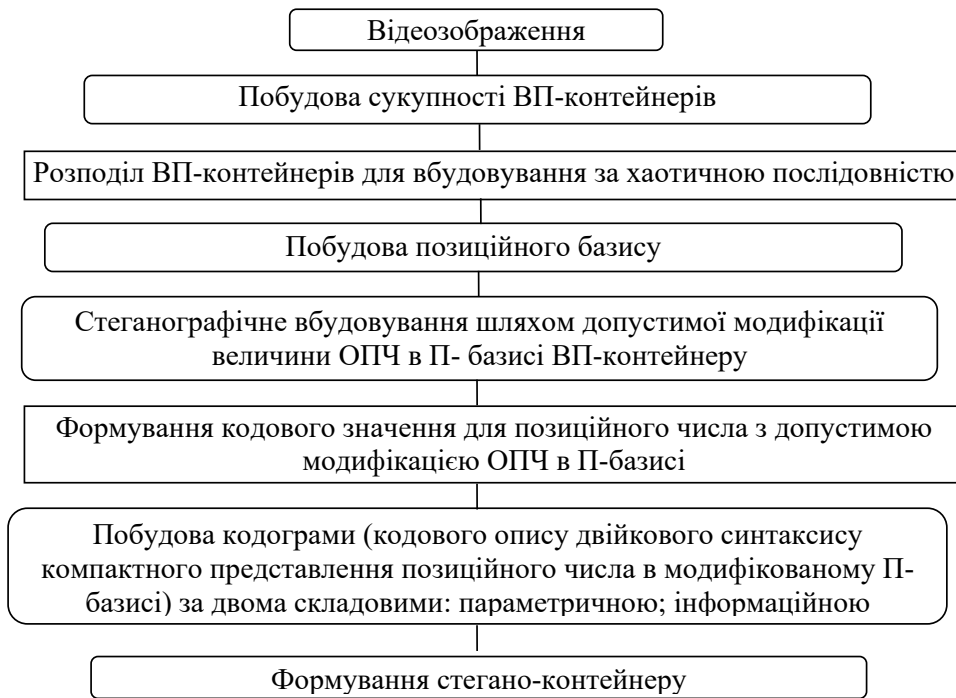


Рис. 1. Схема послідовності етапів стеганографічного вбудовування в адаптивному П-базисі

нення ВП-контейнеру з використанням сукупності залежностей його змісту одночасно для скорочення надмірності та приховування інформації. Для цього з врахуванням модифікованої величини ОПЧ  $r'_{i,j}$  застосовується формула:

$$N'_j = \sum_{i=1}^m s_{i,j} \cdot f_{wc}(\Omega_j; r'_{i,j} | \sigma=0) = \sum_{i=1}^m s_{i,j} \cdot W'(\sigma=0)_{i,j}$$

де  $s_{i,j}$  – елемент АПЧ в П-базисі;

$f_{wc}(\Omega_j; r'_{i,j} | \sigma=0)$  – функціонал визначення вагових коефіцієнтів з врахуванням модифікації ОПЧ в П-базисі за умов  $(r'_{i,j} | \sigma=0)$  нівелювання впливу на втрату інформації за показником середньоквадратичного відхилення  $\sigma$ ;

$W'(\sigma=0)_{i,j}$  – ваговий коефіцієнт для  $i$ -го елемента ВП-контейнеру за умов виключення впливу стеганографічних перетворень на цілісність елементів ВП-контейнеру.

**Зворотне перетворення.** Розглянемо процес вилучення вбудованих даних. В загальному випадку такий процес реалізується двома етапами.

Перший етап – вилучення прихованої інформації під час відновлення ВП-контейнеру на основі декомпресії в П-базисі. Такий процес здійснюється в загальному випадку в двох концепціях:

1) у разі стеганографічних перетворень без залучення стеганографічного ключа (наприклад, використовується лише ключ для криптографічного шифрування інформації перед вбудовуванням);

2) у разі використання стеганографічного ключа.

Кожна з таких концепцій розглядається за умов застосування режимів авторизованого та неавторизованого доступу. Найбільший рівень захисту досягається у разі додаткового застосування стеганографічного ключа.

За умов авторизованого режиму доступу на приймальній стороні вважається відомим стеганографічний ключ. Звідси процес декодування та вилучення має доступ до відомостей щодо: правила вбудовування та порядку розподілу прихованої інформації за ВП-контейнерами; значення початкових елементів хаотичних послідовностей. Функціональна-схема етапів процесу вилучення прихованої інформації в П-базисі під час декомпресії ВП-контейнера представлена на рис. 2.

Приріст за кількістю вбудованих даних для розробленого методу відносно існуючих підходів надано в табл. 1. Розрахунки проводяться в режимах: без обліку результатів процесу стиснення вбудованих даних та ВП-контейнеру; врахування попереднього стиснення ВП-контейнеру.

З огляду на дані, що надано в табл. 1, можна заключити те, що досягається перевага для розробленого методу стегано-перетворень за кількістю вбудованої інформації до ВП-контейнеру. Такі результати отримано в процесі проведення експериментальних досліджень в умовах забезпечення заданого рівня маскування факту наявності стегано-перетворень. При цьому означена

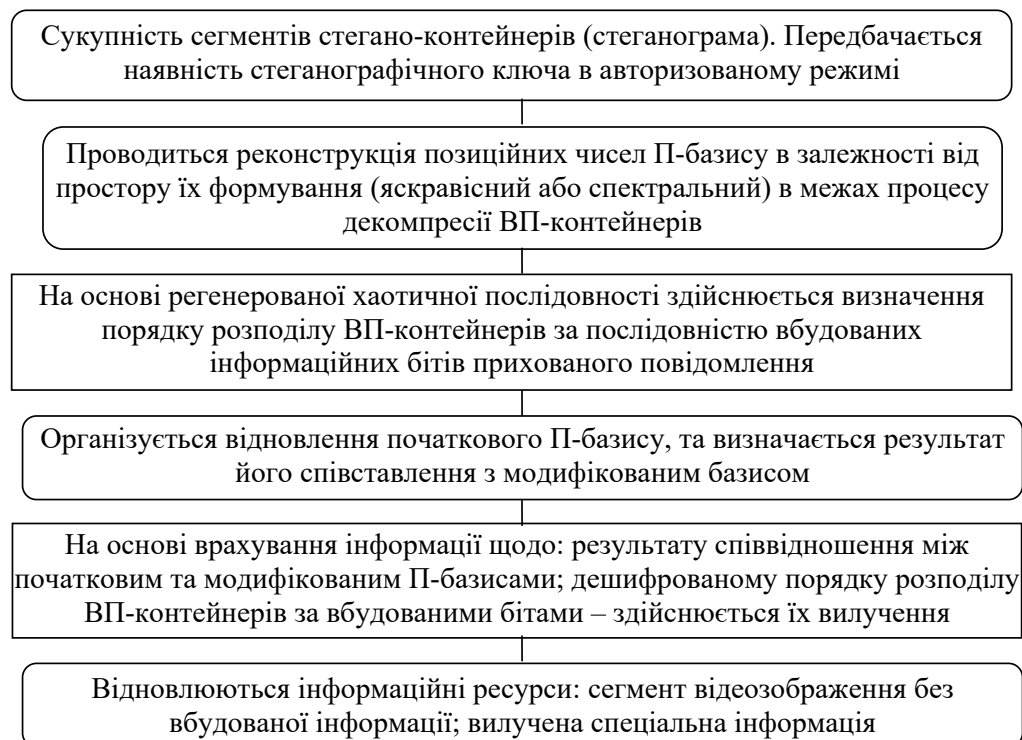


Рис. 2. Функціональна схема видалення прихованої інформації під час декомпресії ВП-контейнеру в П-базисі з використанням компонент стеганографічного ключа щодо їх розподілу

Таблиця 2

Приріст за величиною стеганографічної ємності  $v_{hid}$  для створеної комплексної системи відносно існуючих підходів, %

| Розмір $m \times n$<br>відео-контейнеру | $v_{hid}$ , біт/ піксель, % | $v_{hid}$ біт/піксель, %<br>(у разі стиснення відеоданих-контейнерів) |
|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $4 \times 4$                            | 7                           | 14                                                                    |
| $6 \times 6$                            | 4                           | 8                                                                     |
| $8 \times 8$                            | 2                           | 5                                                                     |

перевага в залежності від розміру ВП-контейнеру має такі оцінки: в режимі без врахування процесів стиснення ВП-контейнерів в середньому 5 %; в режимі стиснення ВП-контейнерів та прихованої інформації в середньому на 10 %.

**Висновки.** 1. Розроблено метод стеганографічних перетворень в структурному просторі на

основі модифікації П-базису за умов виявлення відповідних ознак в спектрально-квантованому описі відеосегментів.

2. Доведена перевага створеного методу за кількістю вбудованої інформації в умовах заданого рівня маскування факту наявності прихованої інформації.

#### Список літератури:

1. Sharma R., Bollavarapu S. Data Security using Compression and Cryptography Techniques. *International Journal of Computer Applications*. 2015. Vol. 117. No. 14. P. 15–18. DOI: <https://doi.org/10.5120/20621-3342>
2. Dipankar D. Comparative Analysis of Steganographic Techniques for Data Hiding in Digital Images. *Journal contribution*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.30621860.v1>
3. Ravindra A., Bansod S., Singh S. K. LSB-Based Image Steganography Using Image Enlargement. *Computing Technologies (ICOCT): Proceedings International Conference, Bengaluru, India, 2025*, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOCT64433.2025.11118799>
4. Barannik D., Barannik V. Steganographic Coding Technology for Hiding Information in Infocommunication Systems of Critical Infrastructure. *Advanced Trends in Information Theory (ATIT): Proceedings IEEE 4th International Conference Kyiv, Ukraine. 2022*. P. 88–91. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATIT58178.2022.10024185>

5. Bas P., Filler T., and Pevný T. Break our steganographic system – the ins and outs of organizing BOSS. In T. Filler, T. Pevný, A. Ker, and S. Craver, editors, *Information Hiding, 13th International Conference*. – vol.6958 of *Lecture Notes in Computer Science*. pp. 59-70. Prague, Czech Republic. 2011. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24178-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24178-9_5)
6. A Method of Scrambling for the System of Cryptocompression of Codograms Service Components / Barannik, V. et al. In: Klymash, M., et al. *Emerging Networking in the Digital Transformation Age. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 965. Springer, Switzerland, Cham, 2022. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_26).
7. Основи теорії структурно-комбінаторного стеганографічного кодування: монографія / В.В. Бараннік та ін. Харків: Видавництво «Лідер», 2017. 256 с.
8. Barannik V., Alimpiev A., Barannik D., Barannik N. Detections of sustainable areas for steganographic embedding. *East-West Design & Test Symposium (EWDTS): Proceedings IEEE 4th International Conference*. 2017, P. 555–558. DOI: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110028>.
9. Бараннік Д.В. Метод двокаскадної імплантації прихованої інформації на основі стеганокомпресійних перетворень. *Інформаційні технології та електронна інженерія*. 2024. № 1. С. 31–38.
10. Barannik V., Shiryaev A. Quadrature compression of images in polyadic space. *Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of International Conference*. 2012, P. 422–422. INSPEC Accession Number: 12713484.
11. Бараннік Д.В. Технологія приховування інформативного контенту в динамічному потоці відеосегментів. *Наукоємні технології*. 2023. № 4. С. 408–415. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.60.18270>.
12. Barannik V., Khimenko V., Barannik N. Method of indirect information hiding in the process of video compression. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2021. №. 4. P. 119–131. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.4>

#### **Barannik V.V., Prokopenko R.O. THE METHOD OF STEGANOGRAPHIC TRANSFORMATIONS IN POSITIONAL SPACE**

*The article substantiates the fact that in conditions of active counteraction from the opposing side, difficulties arise in the process of ensuring the security of video information transmitted using information and communication systems from the boron complex. The basis of the scientific problem here is the contradiction between the requirements for reducing the bit volume and ensuring the confidentiality and integrity of information. The article shows that one of the approaches to protecting video information is steganography methods. A distinct advantage here concerns the possibility of protecting information by hiding it in video containers without destroying its content. The basic method, which has the most widespread practical application and testing, is the method of embedding in the least significant bit of the binary syntax of the container. The LSB method belongs to the class of direct substitution methods. The article shows that one of the promising ones is the development of methods for embedding information using the LSB mechanism in quantized spectral space. In this case, information is hidden in the least significant bit groups of the coefficients of the discrete cosine transform. This variant of information hiding using the LSB method has more practical application. However, it is characterized by an imbalance between: the amount of information being embedded (steganographic capacity); the value of the segment compression coefficient-VKN. Such an imbalance is due to the fact that due to the embedding of information, important features that are used in the process of further compression are changed or partially destroyed. The justification is provided for the fact that for the further development of steganography methods it is proposed to use approaches based on the establishment of functional dependencies in the field of detecting structural features. A method of steganographic transformations in structural space is developed based on the modification of the P-basis under the conditions of detecting the corresponding features in the spectral-quantized description of video segments. The advantage of the created method in terms of the amount of embedded information under the conditions of a given level of masking of the fact of the presence of hidden information is proved.*

**Keywords:** robotic complex, containers of visual origin, redundancy reduction, structural dependencies, positional basis.

Дата першого надходження статті до видання: 09.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026



**Беляков Р.О.**

<https://orcid.org/0000-0001-9882-3088>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Чурілов І.О.**

<https://orcid.org/0009-0003-9627-3221>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

## МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ МАРШРУТИЗАЦІЄЮ НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ КЛАСУ MANET

Стаття присвячена аналітичному опису моделі інтелектуального управління маршрутизацією в наземно-повітряній комунікаційній мережі класу MANET. Управління мережами MANET є складним завданням через високу мобільність вузлів, обмежені ресурси: енергію батареї, технічні характеристики комунікаційних засобів, протоколи різних рівнів моделі OSI з урахуванням особливостей побудови комунікаційних мереж повітряного та наземного рівня за умови мінімізації централізованого управління в них. Наукова новизна розробленої математичної моделі полягає в удосконаленні процесу формування управляючих рішень на мережевому, каналному та фізичному рівнях моделі OSI за рахунок одно-крокових нейромережових алгоритмів на виконання користувальницьких вимог із забезпечення якості інформаційного обміну.

Досягнення поставленої мети передбачає формалізацію задачі управління у вигляді марковського процесу прийняття рішень з крос-рівневим описом стану мережі, синтез функції нагороди, що відображає компроміс між якістю обслуговування, енергоефективністю та обсягами службового трафіка, а також розробку децентралізованого алгоритму вибору маршрутів передачі та потужності радіовипромінювання на основі оцінки функції цінності стан-дія з урахуванням довірчих інтервалів стохастичних параметрів вузлів мережі.

Використання такого підходу може забезпечити ефективне управління мережею, адаптуючись до змін у середовищі та враховуючи різні цільові функції в режимі часу близького до реального.

Прогнозується, що застосування одно-крокових RL – алгоритмів із нейромережевою апроксимацією функції цінності в задачах управління маршрутизацією MANET-FANET є більш адекватним до нестационарних умов функціонування мережі, ніж багатокрокові або офлайн-орієнтовані підходи, оскільки дозволяє оперативно реагувати на локальні зміни топології, якості каналів та залишкової енергії вузлів.

**Ключові слова:** маршрутизація, комунікаційна мережа, MANET, БпЛА, система інтелектуального управління, нейромережі, екстремальне машинне навчання, прогнозування, оцінка параметрів, вагові коефіцієнти, потужність радіовипромінювання.

**Постановка проблеми.** Управління наземно-повітряними комунікаційними мережами класу MANET-FANET є складним завданням через їхню динамічну природу, високу мобільність вузлів, обмежені ресурси (наприклад, енергію батареї, технічні характеристики комунікаційних засобів, протоколи різних рівнів моделі OSI, тощо), що в поєднанні із вимогою щодо зменшення рівня централізованого контролю вимагає розробки моделей, методів, методик, алгоритмів для підви-

щення продуктивності мобільних комунікаційних мереж спеціального призначення [1].

Зміна топології мереж такого класу відбувається дуже швидко, тому у авторів виникла ідея перейти від алгоритму AOS-ELM (як “швидкого регресора/класифікатора”), що в основі дослідження [1] до one-step нейромережових алгоритмів (у сенсі одно-крокового бутстрепінгу в RL: TD(0), SARSA(0), Q-learning), адже у MANET-FANET топологія й стан каналів змінюються

швидше, ніж процес “накопичення” навчальних даних для прийняття оптимальних рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Моделювання Ad-Hoc мереж є предметом досліджень низки науковців, що підтверджується працями у сфері MANET, VANET та FANET, а також методів інтелектуального керування мережевими параметрами та маршрутизацією [1–21]. У попередніх підходах науковці здійснювали оптимізацію функціонування мережі за одним або декількома показниками якості, з урахуванням енергетичної ефективності, стабільності зв’язності, швидкодії, надійності маршрутів і динаміки топології [10–13, 20–21]. У роботі [10] запропоновано багатокритеріальну стратегію оптимізації мережових параметрів із орієнтацією на енергоефективність Ad-Hoc мереж, у [11] розглянуто модифікацію AODV із використанням реалістичної моделі мобільності, що дозволяє точніше враховувати поведінку вузлів у просторі, а в [12] представлено підхід багатокритеріального керування топологією бездротової мережі, що підвищує стійкість і керованість мережевої структури. У дослідженні [13] оптимізацію планування та передавання мультимедійних пакетів виконано з використанням гібридизованого генетичного алгоритму. Дослідження мобільності як одного з визначальних чинників ефективності MANET розглядається в роботах [2, 4, 14], де запропоновано відповідні моделі, механізми прогнозування або інтеграції наземних та повітряних компонентів мережі. Зокрема, в [14] обґрунтовано проблематику інтеграції FANET у мобільну комунікаційну мережу спеціального призначення, що є важливим для реалізації наземно-повітряних комунікаційних мереж.

На практиці помітну частку досліджень складають евристичні протоколи маршрутизації, які спираються на географічні критерії, прогнозування мобільності або біоінспіровані метаевристики. Так, географічний евристичний протокол для VANET запропоновано в [15], підхід прогнозування мобільності для UAV-мережі розглянуто в [19], алгоритмічні рішення на основі мурашиних колоній наведено в [16], а на основі бджолиних колоній – у [17].

Разом із тим, у ряді праць підкреслюється, що аналітично обґрунтовані алгоритми та глобальні оптимізаційні стратегії часто мають обмеження щодо застосування в реальних умовах високодинамічних мереж через обчислювальну складність, обмежені ресурси вузлів та неповноту інформації про стан мережі [10–13, 16–17].

З метою подолання зазначених обмежень останніми роками активно розвиваються протоколи маршрутизації та механізми керування мережевими параметрами на основі машинного навчання, що орієнтовані на роботу зі стрімінговими даними та адаптацію до зміни середовища [5, 7, 9].

Також широко застосовуються методи навчання з підкріпленням (RL, Reinforcement Learning), що дозволяють інтелектуальному агенту (вузлу комунікаційної мережі) формувати оптимальну стратегію дій на основі локальних спостережень та системи винагород [20–21]. Зокрема, в [20] представлено протокол маршрутизації FANET на основі Q-learning із врахуванням топологічних факторів, а в [21] запропоновано мультикритеріальну оптимізацію процесу маршрутизації повітряної комунікаційної мережі із використанням Q-learning.

Водночас слід зазначити, що хоча протоколи маршрутизації побудовані із використанням машинного навчання забезпечують переваги над класичними протоколами з точки зору адаптивності та здатності враховувати складні нелінійні закономірності мережових процесів [3, 20–21], однак, на ряду із перевагами відносно традиційних протоколів маршрутизації, машинне навчання вимагає великих обсягів вихідних даних, що може викликати суттєві ресурсні витрати і для наземно-повітряних мереж вони розроблені фрагментарно.

Таким чином, оптимізація процесів інформаційного обміну в наземно-повітряних комунікаційних мережах шляхом удосконалення існуючих моделей інтелектуальних систем управління є перспективним напрямком наукових досліджень.

**Постановка завдання.** Метою роботи є удосконалення математичної моделі інтелектуального крос-рівневого управління маршрутизацією та радіоресурсами наземно-повітряної комунікаційної мережі класу MANET-FANET шляхом застосування одно-крокових нейромережових алгоритмів підкріплювального навчання (one-step RL із нейромережевою апроксимацією функції цінності), які забезпечують оперативне формування децентралізованих управлінських рішень в умовах динамічної топології, обмежених енергетичних ресурсів вузлів та змінних характеристик радіоканалів.

Удосконалено математичну модель інтелектуального управління маршрутизацією в наземно-повітряних комунікаційних мережах класу MANET-FANET, у якій задача вибору маршруту передачі та потужності радіовипромінювання

формалізується як децентралізований Марківський процес прийняття рішень з крос-рівневим простором станів, що одночасно враховує параметри фізичного та мережевого рівнів моделі OSI.

**Виклад основного матеріалу. Вихідні умови функціонування мережі.** Розглядається наземна комунікаційна мобільна радіомережа класу MANET розмірністю до сотні мобільних вузлів, зони переміщення яких попередньо задані відповідно до визначених рангів [1]. Мобільні вузли поділяються на дві основні підмережі: наземна підмережа мобільних користувачів (переносні радіозасоби, радіозасоби на транспортних засобах) та повітряна підмережа (повітряна комунікаційна аероплатформа). Наземна комунікаційна мережа не має прив'язки до будь-якої телекомунікаційної інфраструктури загального користування. Кожен мобільний комунікаційний вузол оснащений системою позиціонування, комунікаційним обладнанням, антенними пристроями, системою живлення та відповідною системою управління. Кожен мобільний комунікаційний вузол може бути представлений як об'єкт із системою управління представленою сукупністю агентів навчання із специфічними для кожної підмережі цільовими функціями [3].

Для забезпечення швидкодії та точності формування множини управляючих рішень  $Y(t)$  інтелектуальної системи управління радіозв'язністю замість алгоритмів нечіткої логіки, алгоритмів екстремального машинного навчання [11], пропонується використовувати одно-крокові нейромережеві алгоритми навчання з підкріпленням.

Нехай наземно-повітряна комунікаційна мережа описується графом:

$$G^{\psi}(t) = (V^{\psi}, E^{\psi}), \psi \in \{1, 2, 3\},$$

де множина ребер  $E^{\psi}(t)$  визначається поточними умовами радіодоступності між вузлами, тобто радіозв'язністю між вузлами  $ij$  на  $\psi$ -му рівні  $Z_{ij}^{\psi}(t)$ .

Стан  $i$ -го вузла (локальний) формується на основі підмножини параметрів  $X^{\psi}(t)$ , отриманих з фізичного, каналного та мережевого рівнів моделі OSI. має вигляд:

$$s_i(t) = [e_i(t), p_i(t-1), \Delta BER_{ij}^{\psi}(t), \mathcal{N}_i(t), \Pi_{ij}^{\psi}, q_i(t), \widehat{d}_i^{(b)}(t)], \quad (1)$$

де  $e_i(t)$  – заряд батареї;

$\Delta BER_{ij}^{\psi}(t) = BER_{ij}^{\psi}(t) - BER_{ij}^{\psi}(t-1)$ ;  $\mathcal{N}_i(t) = \{j: Z_{ij}^{\psi}(t) = 1\}$  – вузли-сусіди;  $\Pi_{ij}^{\psi}$  – пріоритет трафіка;  $q_i(t)$  – локальна черга/навантаження (важливо для QoS);  $\widehat{d}_i^{(b)}(t) d^i(b)$  – оцінка “наближення” до адресата  $b$  (за GPS/ETX/географією), тобто, в дослідженні

припускається, що сигнали глобальної навігаційної супутникової системи наявні.

**Методологія дослідження.** В дослідженні було зроблено припущення, що використання одно-крокових нейромережевих алгоритмів навчання з підкріпленням (one-step RL із нейромережевою апроксимацією функції цінності) для прийняття управлінських рішень дозволить забезпечити суттєво більшу швидкість та точність управління процесами маршрутизації із урахуванням ресурсних обмежень.

Дії за Марківським процесом прийняття рішення.

Одна крос-рівнева дія вузла  $i$ :

$$a_i(t) = \text{big}(j^*(t), p_i^*(t)), \quad (2)$$

де  $j^* \in N_i(t)$  – вибір вузла наступного переходу, а  $p_i^*(t) \in [p_{\min}, p_{\max}]$  – потужність передачі.

В даному дослідженні, замість жорстких обмежень щодо вибору рішення із області допустимих рішень, для використання концепції одно-крокової оптимізації використовуються “м'які” обмеження через штрафи, що дозволяє забезпечити компроміс між QoS та ресурсними витратами в умовах динамічної топології MANET–FANET.

Таким чином, удосконалена нагорода  $L_i(t)$  через штрафи з урахуванням обмежень одно-крокової оптимізації в нагороду  $r_i(t)$  матиме вигляд:

$$L_i(t) = r_i(t) - \mu_1 [BER_{ij}^{\psi}(t) - BER_{\text{дон}}^{\psi}]_+ - \mu_2 [e_{\min} - e_i(t)]_+, \quad (3)$$

де  $[x]_+ = \max(0, x)$  – функція позитивної частини, що забезпечує властивість зростання штрафу пропорційно величині порушення  $\mu_1, \mu_2 > 0$ ,  $\mu_1$  – коефіцієнт штрафу за порушення обмеження якості зв'язку (QoS),  $\mu_2$  – коефіцієнт штрафу за порушення енергетичного обмеження вузла.

Нагорода  $r_i(t)$  за «правильний» вибір (побудову, підтримку діючого) маршруту на виконання обмежень по потужності радіовипромінювання  $\{P(t), M(t)\}$ :

$$r_i(t) = \alpha_1 \cdot \underbrace{\{Z_{ij}^{\psi}(t) = 1\}}_{\text{зв'язність}} - \alpha_2 \cdot \underbrace{E_{ij}(t)}_{\text{енерговитрати}} - \alpha_3 \cdot \underbrace{D_{ij}(t)}_{\text{затримка/черги}} - \alpha_4 \cdot \underbrace{O_i(t)}_{\text{службовий оверхед}} + \alpha_5 \cdot \underbrace{\Pi_{ij}^{\psi}}_{\text{пріоритет}},$$

де  $E_{ij}(t)$  можна представити як  $E_{ij}(t) \approx p_i(t) \cdot \Delta t + E_{\text{прог}}(t)$ , а  $O_i(t)$  – частка/обсяг контрольного трафіка (HELLO, RREQ/RREP тощо).

На жаль, у наукових публікаціях часто недостатньо деталізується вплив зростання обсягів службового трафіку на процес інформа-

ційного обміну, обмежуючись узагальненими поясненнями та посиланнями на технологічні компроміси функціонування мереж. Водночас підкреслюється, що штраф за overхед – недооцінений важіль, так як в комунікаційних мережах MANET-FANET часто “оптимальний маршрут” математично існує, але в реальному часі руйнується саме сильним приростом службового трафіку в умовах високої мобільності (динамічної топології).

Для побудови децентралізованої політики керування маршрутизацією використовується one-step навчання з підкріпленням RL (RL – Reinforcement Learning). Функція  $Q_0(s, a)$  апроксимує очікувану сумарну дисконтовану нагороду при виконанні дії  $a$  у стані  $s$ . На кожному кроці формується one-step TD-ціль (TD – temporal difference: різниця між “новою ціллю” і “старою оцінкою”).

One-step TD-ціль (бутстрепінг на 1 крок).

Для оцінки  $Q_i(s, a)$ :

$$y_i(t) = r_i(t) + \gamma \max_{a'} Q_i(s_i(t+1), a'), \quad (4)$$

та мінімізації втрат (квадратичної помилки):

$$\min (y_i(t) - Q_0(s_i(t), a_i(t)))^2. \quad (5)$$

У разі використання SARSA(0) замість оператора максимум  $\max_{a'} Q_i$  підставляється фактично вибрана наступна дія  $a_i(t+1)$ , що відповідає навчанню за поточною політикою (on-policy).

У зв'язку із тим, що в умовах високої динаміки зміни топології MANET-FANET інтенсивність службового трафіка є двоспрямованим фактором: зростання службової інформації підвищує актуальність знань про стан мережі та покращує якість управлінських рішень, однак одночасно зменшує частку корисної пропускну здатності. Таким чином, *задача інтелектуального управління полягає у знаходженні компромісного значення  $O^*$ , що максимізує інтегральний показник ефективності мережі.*

Перевага запропонованого one-step RL із нейромережевою апроксимацією функції цінності підходу полягає в тому, що за використання one-step RL із нейромережевою апроксимацією функції цінності можливо адаптивно підбирати рівень “керування/overхеду” не на пряму, бо: якщо часті перебудови маршрутів “корисні”, то RL це підсилить, і навпаки: якщо перебудови «з'їдають» канал, то RL отримає негативну нагороду і призупинить ці дії, утримуючи автоматичний баланс:

Тобто one-step RL із нейромережевою апроксимацією функції цінності забезпечує автоматичний баланс:

$$\max_{\pi} E \left[ \sum_t \gamma^t \left( \underbrace{C_{\text{data}}(t)}_{\text{корисний ефект}} - \alpha \underbrace{O(t)}_{\text{вартість керування}} \right) \right]. \quad (6)$$

Результати моделювання (рис. 1) процесу комунікаційного обміну за допомогою мови програмування Python із вихідними даними перерахованими вище для алгоритмів – AOS ELM, FOS ELM [7], Fuzzy (алгоритм нечіткої логіки) в порівнянні із запропонованим one-step RL підходом. Результат моделювання підтверджує гіпотезу про суттєве скорочення часу прийняття оптимальних рішень із управління маршрутизацією комунікаційних вузлів наземно-повітряної мережі.

Із графіку (рис. 1) легко помітити, що застосування one-step RL із нейромережевою апроксимацією функції цінності підходу забезпечує приріст точності прогнозування параметрів вузлів на 5,3% при порівняно меншому періоді навчання – на 10 с, ніж при застосуванні AOS ELM алгоритму, застосованого у вихідній моделі при однакових умовах. Під “аассурасу” на графіку (рис. 1) у даній роботі розуміється інтегральний показник ефективності функціонування мережі  $J$ , який комплексно враховує коефіцієнт доставки пакетів, середню затримку, службовий трафік та енерговитрати вузлів мережі.

Таким чином, для мереж класу MANET-FANET, які характеризуються високою динамічністю топології, обмеженими енергетичними ресурсами та значною не стаціонарністю параметрів радіоканалів, доцільним є застосування підходів навчання із підкріпленням (Reinforcement Learning, RL). Це обґрунтовано тим, що поточний вибір вузла ретрансляції (next-hop) визначає не лише миттєву якість передачі, але й подальший прогнозований стан мережі, зокрема рівень енергоспоживання вузлів, стійкість радіозв'язності та інтенсивність службового трафіка, що формує довгострокову ефективність маршрутизації. У цьому контексті RL-формалізація задачі управління є більш природною порівняно з використанням лише регресійних моделей прогнозування, оскільки дозволяє оптимізувати послідовність керуючих дій із урахуванням їхніх майбутніх наслідків.

Разом з тим нейромережевий алгоритм Adaptive Online Sequential Extreme Learning Machine (AOS-ELM) доцільно розглядати ефективним компонентом інтелектуального агента комунікаційного вузла, що забезпечує швидке онлайн-навчання та адаптивне формування ознак стану мережі для подальшого прийняття

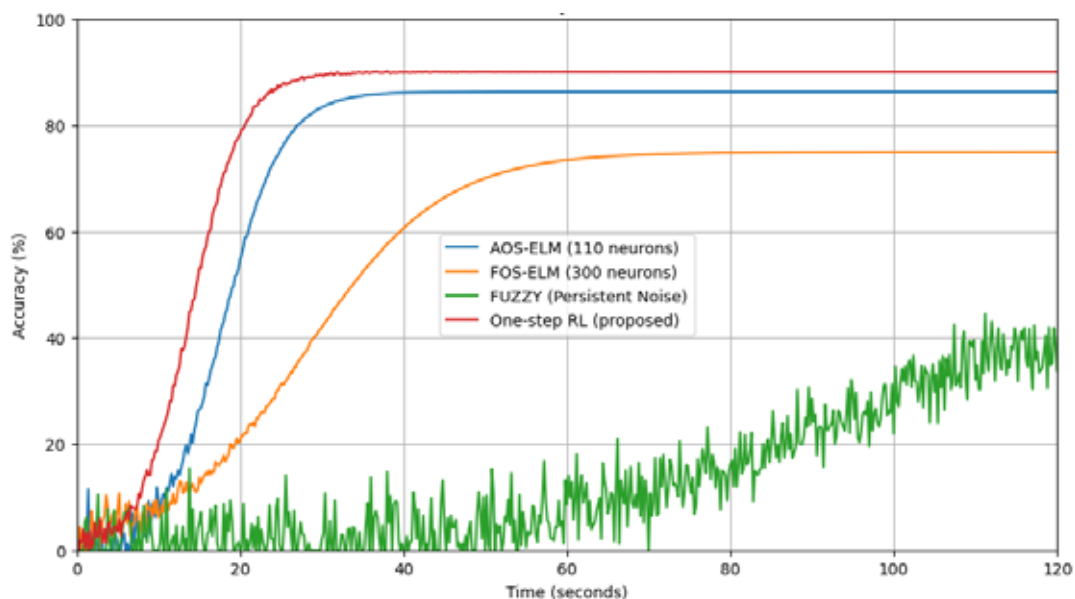


Рис. 1. Графіки точності та часу процесу формування управляючих рішень із управління маршрутизацією

рішень. Крім того, AOS-ELM може використовуватися як базовий алгоритм порівняння при оцінці результативності запропонованого підходу, що забезпечує цоктність експериментальної верифікації та підвищує обґрунтованість отриманих висновків.

**Висновки.** В статті представлено удосконалену математичну модель інтелектуального управління маршрутизацією наземно-повітряної комунікаційної мережі класу MANET, проведено формалізований опис запропонованої моделі.

Наукова новизна полягає в переході до one-step RL як ядра децентралізованого крос-рівневого управління маршрутизацією та потужністю у MANET–FANET, із штрафним врахуванням

QoS/енергії та додатковим врахуванням інтенсивності службового трафіку.

Теоретична цінність розробленого наукового результату полягає у формалізації управління як Марківського процесу із крос-рівневим станом і інтегральною функцією корисності, що створює чіткий математичний фундамент для подальшого розвитку інтелектуальних систем управління для даного класу комунікаційних мереж.

Запропонована модель може бути використана для проєктування мереж спецпризначення з високою мобільністю та ресурсними обмеженнями. Напрямок подальших досліджень полягає у розробці методу маршрутизації на основі розробленої моделі та особливостей воєнного середовища функціонування.

#### Список літератури:

1. Беляков Р. О., Фесенко О. Д. Удосконалена модель інтелектуального управління вузловими ресурсами комунікаційної мережі класу MANET. *Scientific Notes of Taurida National V. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2023. № 5. С. 93–98. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/16>.
2. Беляков Р. О., Фесенко О. Д. Модель мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального призначення. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2023. № 51. С. 130–138. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17>.
3. Phull N., et al. Enhancing vehicular ad hoc networks' dynamic behavior by integrating game theory and machine learning techniques for reliable and stable routing. *Security and Communication Networks*. 2022. Vol. 2022. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/4108231>.
4. Hosek J., et al. Implementation of mobility management methods for MANET. *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*. 2012. Vol. 1, № 2–3. DOI: <https://doi.org/10.11601/ijates.v1i2-3.39>.
5. Cao W., et al. Fuzziness-based online sequential extreme learning machine for classification problems. *Soft Computing*. 2018. Vol. 22, № 11. P. 3487–3494. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3021-4> (дата звернення: 13.09.2023).

6. Romaniuk V. A., Bieliakov R. O. Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2023. № 50. P. 125–130. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19>.
7. Yang R., Xu S., Feng L. An ensemble extreme learning machine for data stream classification. *Algorithms*. 2018. Vol. 11, № 7. P. 107. DOI: <https://doi.org/10.3390/a11070107> (дата звернення: 13.09.2023).
8. Zhebka V. V. Research of machine learning methods and their application for forecasting use outflow by telecommunications services. *Connectivity*. 2020. Vol. 146, № 4. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2020.042231>.
9. Zhang J., Li Y., Xiao W. Adaptive online sequential extreme learning machine for dynamic modeling. *Soft Computing*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05289-6> (дата звернення: 13.09.2023).
10. Olascuaga-Cabrera J. G., Lopez-Mellado E., Mendez-Vazquez A. A multi-objective PSO strategy for energy-efficient ad-hoc networking. *IEEE Cybernetics Systems: Man (SMC) Conference : proceedings*. 2011.
11. Babaei H., Romoozi M. Multi objective AODV based on a realistic mobility model. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*. 2010. Vol. 7, Issue 3, № 3. May.
12. Banner R., Orda A. Multi-objective topology control in wireless networks. *IEEE INFOCOM : proceedings*. 2008.
13. Selvi R., Rajaram R. Multiple-objective optimization of multimedia packet scheduling for ad hoc networks through hybridized genetic algorithm. *International Journal of Multimedia & Its Applications (IJMA)*. 2011. Vol. 3, № 3. August.
14. Беляков Р. Проблема інтеграції повітряної мережі класу FANET в мобільну комунікаційну мережу спеціального призначення. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2023. № 53. С. 263–276. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-40>.
15. Urquiza-Aguilar L., Tripp-Barba C., Igartua M. A. A geographical heuristic routing protocol for VANETs. *Sensors*. 2016. Vol. 16. P. 1567.
16. Yu Y., Ru L., Chi W., Liu Y., Yu Q., Fang K. Ant colony optimization based polymorphism-aware routing algorithm for ad hoc UAV network. *Multimedia Tools and Applications*. 2016. Vol. 75. P. 14451–14476.
17. Zhao B., Ding Q. Route discovery in flying ad-hoc network based on bee colony algorithm. *2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 29–31 March : proceedings*. Dalian, China, 2019. P. 364–368.
18. Patel J., El-Ocla H. Energy efficient routing protocol in sensor networks using genetic algorithm. *Sensors*. 2021. P. 7060.
19. Lin L., Sun Q., Wang S., Yang F. A geographic mobility prediction routing protocol for ad hoc UAV network. *2012 IEEE Globecom Workshops : proceedings*. Anaheim, CA, USA, 3–7 December 2012. P. 1597–1602.
20. Arafat M. Y., Moh S. A Q-learning-based topology-aware routing protocol for flying ad hoc networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9. P. 1985–2000.
21. Liu J., Wang Q., He C., Jaffrès-Runser K., Xu Y., Li Z., Xu Y. QMR: Q-learning based multi-objective optimization routing protocol for flying ad hoc networks. *Computer Communications*. 2020. Vol. 150. P. 304–316.

## **Bieliakov R.O., Churilov I.O. INTELLIGENT ROUTING CONTROL MODEL FOR GROUND–AIR MANET-CLASS COMMUNICATION NETWORKS**

*The paper is devoted to an analytical description of an intelligent routing control model for a ground–air communication network of the MANET class. Managing MANETs is a challenging task due to the high mobility of nodes and limited resources, including battery energy, technical characteristics of communication equipment, and protocol constraints across multiple layers of the OSI model. These challenges are further intensified by the architectural specifics of integrating airborne and terrestrial network segments under the requirement of minimizing centralized control. The scientific novelty of the proposed mathematical model lies in improving the process of generating control decisions at the network, data link, and physical layers of the OSI model by employing one-step neural network–based algorithms to meet user requirements for information exchange quality.*

*Achieving the stated objective involves formalizing the control problem as a Markov decision process with a cross-layer state representation of the network, designing a reward function that captures the trade-off between Quality of Service, energy efficiency, and control traffic overhead, as well as developing a decentralized algorithm for selecting the next-hop relay and transmission power based on the state–action value function estimation while accounting for confidence intervals of stochastic node parameters.*

*The proposed approach can provide effective network control by adapting to environmental changes and simultaneously considering multiple objective functions in near real-time. It is expected that applying one-step reinforcement learning algorithms with neural network approximation of the value function to MANET–*

*FANET routing control tasks is more suitable for non-stationary network operation conditions than multi-step or offline-oriented approaches, since it enables rapid response to local variations in topology, channel quality, and residual node energy.*

**Keywords:** *routing, communication network, MANET, UAV, intelligent control system, neural networks, extreme learning machine, forecasting, parameter estimation, weighting coefficients, radio transmission power.*

Дата першого надходження статті до видання: 24.01.2026  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026  
Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026



УДК 621.396.96

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/08>**Бойко Ю.М.**<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

Хмельницький національний університет

**Пятін І.С.**<https://orcid.org/0000-0003-1898-6755>

Відокремлений структурний підрозділ

«Хмельницький політехнічний фаховий коледж

Національного університету «Львівська політехніка»»

**Єрмоєнко О.І.**<https://orcid.org/0000-0001-5110-3761>

Хмельницький національний університет

## МЕТОДИКА ВИСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ АБОНЕНТСЬКОГО ДОСТУПУ WI-FI 6/6E НА ОСНОВІ ОЦІНЮВАННЯ ЧАСУ ПРИБУТТЯ СИГНАЛІВ

Стрімкий розвиток мереж абонентського доступу з підтримкою стандартів Wi-Fi 6/6E (IEEE 802.11ax/az) зумовлює появу нових сервісів, орієнтованих на контекстну обізнаність мережі, зокрема високоточне позиціонування абонентських станцій у приміщеннях та щільно забудованих середовищах. Актуальність роботи полягає у дослідженні методів визначення координат мобільної станції в умовах багатопроменевого поширення сигналів та обмеженого відношення сигнал/шум, характерних для реальних Wi-Fi мереж абонентського доступу.

У статті зосереджено увагу на методах позиціонування на основі оцінювання часу прибуття сигналів (Time of Arrival, ToA) з використанням процедур точного вимірювання часу Fine Timing Measurement (FTM) стандарту IEEE 802.11az та алгоритмів надвисокої роздільності. Запропоновано підхід до визначення відстані між мобільною станцією та точками доступу шляхом математичного моделювання багатопроменевого каналу передачі даних і застосування алгоритму Multiple Signal Classification (MUSIC) для оцінювання часових затримок окремих компонент сигналу.

У роботі виконано чисельне моделювання процесів оцінювання параметрів каналу та позиціонування мобільної станції в умовах функціонування мереж Wi-Fi 6/6E. Визначення координат здійснювалося на основі трилатерації з використанням оцінених відстаней між мобільною станцією та кількома точками доступу. Проведено аналіз впливу співвідношення сигнал/шум, кількості навчальних полів High Efficiency – Long Training Field (HE-LTF) та конфігурації Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO)-системи на точність визначення відстані та координат.

Результати моделювання показують, що застосування алгоритмів надвисокої роздільності у поєднанні з навчальними послідовностями фізичного рівня дозволяє істотно зменшити похибку позиціонування у порівнянні з класичними методами. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу та доцільність його використання у сучасних і перспективних мережах абонентського доступу Wi-Fi для задач внутрішньої навігації, моніторингу присутності користувачів та промислових Internet of Things (IoT)-систем.

**Ключові слова:** Wi-Fi 6/6E, позиціонування абонента, Time of Arrival, MUSIC, трилатерація, багатопроменевий канал, MIMO.

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток мереж абонентського доступу на основі стандартів IEEE 802.11ax/az/be (Wi-Fi 6/6E/7) [1, 2] супроводжується не лише зростанням пропускної

спроможності та щільності підключень, але і появою принципово нових сервісів, орієнтованих на контекстну обізнаність мережі. Одним із ключових таких сервісів є високоточне позиціонування



абонентських станцій у приміщеннях та щільно забудованих середовищах, де супутникові навігаційні системи є малоефективними або повністю непридатними [3].

У сучасних мережах абонентського доступу Wi-Fi позиціонування розглядається як допоміжна, але критично важлива функція, що безпосередньо впливає на якість обслуговування (Quality of Service – QoS), ефективність радіо-ресурсів, енергоефективність клієнтських пристроїв, а також на реалізацію сервісів безпеки, моніторингу присутності, внутрішньої навігації та промислової автоматизації. Водночас умови функціонування Wi-Fi мереж істотно ускладнюють задачу точного визначення координат абонента через багатоприменеве поширення, змінну радіообстановку, наявність перешкод та обмежені апаратні ресурси абонентських станцій [2].

Традиційні методи Wi-Fi позиціонування, що ґрунтуються на індикаторі рівня прийнятого сигналу (Received Signal Strength Indicator – RSSI) або статичних радіокартах [4], демонструють обмежену точність та низьку стійкість до змін середовища, що є неприйнятним для сучасних сценаріїв абонентського доступу з високою мобільністю користувачів і динамічною топологією мережі. Методи зняття радіовідбитків (fingerprinting) [5], хоча і забезпечують прийнятну точність, потребують трудомісткого етапу калібрування та регулярного оновлення бази даних, що істотно ускладнює їх практичне впровадження в реальних мережах доступу.

Запровадження стандарту IEEE 802.11az відкриває нові можливості для високоточного позиціонування за рахунок використання процедур точного вимірювання часу (FTM), інформації про стан каналу (Channel State Information – CSI), оцінок часу прольоту сигналу (Time-of-Flight – ToF), а також кутових параметрів поширення хвиль (Angle of Arrival/Angle of Departure – AoA/AoD), зокрема у міліметровому діапазоні частот [5]. Проте практична реалізація таких методів у мережах абонентського доступу супроводжується низкою проблем, пов'язаних із завадостійкістю вимірювань, обмеженою кількістю доступних відліків, синхронізацією пристроїв, а також впливом шуму та багатоприменевості на точність оцінювання параметрів каналу.

Таким чином, актуальною науково-практичною проблемою є розробка та дослідження методів Wi-Fi позиціонування, адаптованих до умов мереж абонентського доступу, які поєднують високу точність визначення координат абонент-

ської станції із завадостійкою обробкою сигналів та прийнятною обчислювальною складністю. Особливого значення набуває аналіз методів оцінки часу прибуття сигналів та їх спектральних і надроздільних модифікацій у поєднанні з моделями реального Wi-Fi каналу, що дозволяє підвищити достовірність позиційних оцінок у складних радіоумовах.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

В останнє десятиліття проблема високоточного позиціонування у бездротових мережах Wi-Fi стала предметом інтенсивних наукових досліджень [1, 2]. Це зумовлено широким розповсюдженням Wi-Fi як базової інфраструктури абонентського доступу та зростаючою потребою у реалізації сервісів внутрішньої навігації, моніторингу активності користувачів, відстеження рухомого обладнання, а також автоматизації виробничих і логістичних процесів. Особливої актуальності такі задачі набувають у межах концепцій «розумних» будинків, промислового Інтернету речей (Industrial Internet of Things – IIoT) та кіберфізичних систем [6].

Традиційні методи позиціонування в Wi-Fi мережах ґрунтуються на аналізі індикатора рівня RSSI, часових характеристик сигналу (Time of Arrival /Time Difference of Arrival – ToA/TDoA), а також кутових параметрів – кутів приходу (AoA) та відправлення (AoD) сигналу [7]. Найпростішим з практичної точки зору є RSSI-підхід, який дозволяє оцінювати відстань між вузлами мережі на основі емпіричних моделей загасання. Проте в умовах внутрішніх приміщень його точність суттєво погіршується через багатоприменеве поширення, затінення та випадкові перешкоди, що, як правило, обмежує точність позиціонування рівнем кількох метрів [8].

Значним кроком уперед стало впровадження процедури FTM у стандарті IEEE 802.11mc, яка забезпечує можливість вимірювання часу поширення сигналу між точкою доступу та мобільною станцією. Використання FTM дозволило перейти до більш точних оцінок відстані на основі часу прибуття сигналу (ToF), що особливо важливо для задач локалізації у приміщеннях [3]. Водночас у мережах Wi-Fi 4/5/6, що функціонують переважно у діапазонах нижче 6 ГГц, вплив багатоприменевості залишається одним з ключових джерел похибки таких оцінок [8].

Подальший розвиток стандартів позиціонування пов'язаний із впровадженням IEEE 802.11az, який розширює механізми FTM та вводить підтримку на рівні CSI, а також просторових

параметрів сигналу – AoA та AoD [9]. Поєднання часових і кутових оцінок відкриває можливість суттєвого підвищення точності позиціонування, зокрема у складних багатопромених середовищах. Згідно з результатами сучасних досліджень, комбінування ToF та просторових характеристик дозволяє досягати сантиметрової точності визначення координат за умови достатнього відношення сигнал/шум та відповідної конфігурації антенної системи [10]. На рис. 1 схематично поданий сценарій багатопроменового поширення сигналу та принципу вимірювання ToF у Wi-Fi мережі.

На практиці визначення координат мобільної станції в мережах Wi-Fi базується на вимірюванні часових, просторових та енергетичних параметрів сигналу. Одним із ключових параметрів є час прибуття сигналу (ToA), який безпосередньо пов'язаний з відстанню між передавачем та приймачем. За умови відомої швидкості поширення електромагнітної хвилі  $c$ , відстань може бути оцінена як:

$$d = c \cdot t_{ToA} \quad (1)$$

де  $t_{ToA}$  – виміряний час приходу сигналу.

У багатоточкових конфігураціях (три і більше точок доступу) оцінки відстаней або різниць часу приходу використовуються для подальших геометричних методів визначення положення, зокрема трилатерації або гіперболічної локалізації. Для підвищення точності у сучасних стандартах Wi-Fi додатково використовується інформація про кут прибуття та кут відправлення сигналу, що ілюструється на рис. 1.

Однією з фундаментальних проблем часових методів позиціонування є розділення сигналів, що надходять різними шляхами у багатопроменовому каналі. Класичні кореляційні підходи в таких умовах часто не забезпечують достатньої роздільної

здатності, особливо за низького відношення сигнал/шум. Для подолання цих обмежень застосовуються методи надвисокої роздільності (High Resolution Spectral Estimation – HRSE), серед яких одним із найвідоміших є алгоритм MUSIC [11].

Алгоритм MUSIC базується на спектральному розкладанні кореляційної матриці прийнятого сигналу та дозволяє відокремлювати сигнальні та шумові підпростори. У контексті Wi-Fi позиціонування він може бути адаптований як для оцінювання кутових параметрів (AoA), так і для визначення часу прибуття окремих компонент сигналу (ToA), що робить його особливо привабливим для стандартів IEEE 802.11az.

Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень свідчать, що використання MUSIC у поєднанні з FTM-процедурами дозволяє суттєво зменшити похибку позиціонування – до рівня менше кількох десятків сантиметрів за сприятливих умов прийому та адекватної геометрії антенного масиву [8]. Водночас застосування таких методів супроводжується зростанням обчислювальної складності, оскільки потребує обробки великих обсягів вибірок і виконання власного розкладу матриць, що може ускладнювати реалізацію на ресурсно обмежених мобільних пристроях.

Для реалізації кутових методів позиціонування (AoA/AoD) необхідною умовою є використання антенних решіток та алгоритмів формування променя [12]. Формування променя дозволяє просторово фільтрувати сигнали, що надходять з різних напрямків, і тим самим підвищити роздільну здатність системи в кутовій області.

У стандартах IEEE 802.11az та 802.11ay застосовується гібридне формування променя, яке поєднує аналогову та цифрову обробку сигналів. При цьому сигнали з різних антенних елементів зважуються комплексними коефіцієнтами,

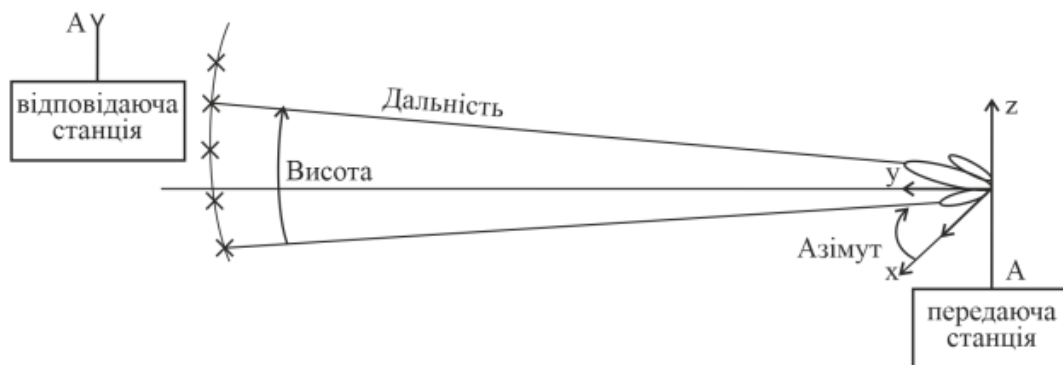


Рис. 1. Ілюстрація багатопроменового поширення сигналу та принципу вимірювання ToF у Wi-Fi мережі

що дозволяє сформувати спрямований промінь у заданому напрямку. Узагальнено вихідний сигнал антенної решітки може бути представлений у вигляді:

$$y(t) = \mathbf{w}^H \cdot \mathbf{x}(t) \quad (2)$$

де  $\mathbf{x}(t)$  – вектор сигналів з антенних елементів;  $\mathbf{w}^H$  – вектор вагових коефіцієнтів формування променя.

Принцип роботи гібридного формування променя в системах Wi-Fi показано на рис. 2.

Альтернативним напрямом досліджень є методи позиціонування на основі відбитків каналу (fingerprinting), які використовують унікальні характеристики радіоканалу для конкретних просторових точок. У сучасних роботах такі підходи часто поєднуються з методами глибокого навчання, зокрема згортковими (Convolutional Neural Networks – CNN) та рекурентними (Recurrent neural network – RNN) нейронними мережами [9]. Як вхідні ознаки при цьому використовуються CSI, імпульсні відгуки каналу (Channel Impulse Response – CIR) або їх спектральні представлення.

Перевагою методів відбитків каналу є їхня відносна стійкість до багатопроменевості та можливість досягнення прийнятної точності навіть за низького відношення сигнал/шум. Разом із тим, такі підходи вимагають формування об'ємних навчальних баз даних, а також їх регулярного оновлення у разі зміни радіооточення, що ускладнює практичне впровадження у динамічних мережах абонентського доступу [10].

З урахуванням розглянутих методів позиціонування, сучасна система Wi-Fi геопозиціонування може бути подана у вигляді багаторівневої структури, яка включає етапи приймання сигналів, оцінювання параметрів каналу, визначення проміжних навігаційних величин (ToA, AoA, RSSI) та обчислення координат мобільної станції.

У загальному випадку задача позиціонування зводиться до оцінювання вектору координат:

$$\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T, \quad (3)$$

на основі множини вимірних параметрів сигналу:

$$\theta = \{t_{ToA}, \phi_{AoA}, P_{RSSI}\} \quad (4)$$

В залежності від обраного підходу (пряма або непряма оцінка положення) ці параметри можуть використовуватися безпосередньо або після попередньої обробки.

Узагальнену структуру системи позиціонування в мережах Wi-Fi наведено на рис. 3.

В таблиці 1 ми представляємо систематизовану оцінку та порівняльний аналіз сучасних методів позиціонування.

Аналіз сучасних наукових джерел показує, що найбільш перспективним є комбінування кількох підходів, зокрема FTM-оцінок часу прибуття, алгоритмів надвисокої роздільності та використання каналної інформації CSI. Така інтеграція дозволяє досягти оптимального співвідношення між точністю, завадостійкістю та практичною реалізованістю, особливо в умовах низького відношення сигнал/шум ( $\text{SNR} < 10$  дБ) [2].

З урахуванням наведеного, у даній статті основну увагу приділено дослідженню методів оцінювання часу прибуття сигналів у мережах Wi-Fi 6/6E з використанням алгоритмів надвисокої роздільності, орієнтованих на застосування в мережах абонентського доступу.

**Постановка завдання.** У статті буде проведено дослідження та оцінку методів позиціонування мобільної станції у мережах абонентського доступу Wi-Fi на основі визначення часу приходу сигналу. Це буде досягнуто шляхом математичного моделювання багатопроменевого каналу передачі даних та застосування алгоритмів надвисокої роздільності для оцінювання часових затримок сигналів у межах стандарту IEEE 802.11az.

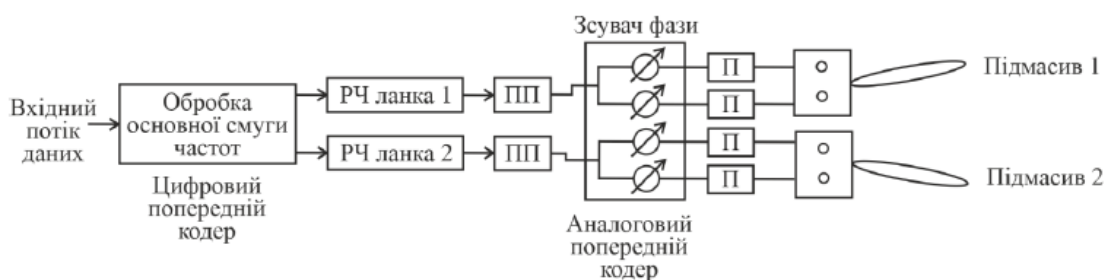


Рис. 2. Структурна схема гібридного формування променя: РЧ – радіочастотне коло; ПП – попередній підсилювач; П – вихідний підсилювач; Підмасив № – підмасив випромінювачів фазованих антенних решіток (ФАР)

Таблиця 1

## Систематизована оцінка та порівняльний аналіз сучасних методів позиціонування

| Метод                 | Переваги                       | Недоліки                         |
|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| RSSI                  | Простота реалізації            | Низька точність у приміщеннях    |
| FTM/ToF (802.11mc/az) | Покращена оцінка відстані      | Чутливість до багатопроменевості |
| MUSIC                 | Надвисока роздільна здатність  | Висока обчислювальна складність  |
| Fingerprinting + DL   | Висока практична точність      | Потреба у навчальній базі        |
| AoA/AoD               | Покращена геометрична точність | Необхідність антенної решітки    |

Для перевірки ефективності обраного підходу буде реалізовано алгоритм оцінювання часу приходу сигналу з використанням методу MUSIC та виконано визначення координат мобільної станції на основі трилатерації. Буде проведено аналіз точності позиціонування за умов зміни відношення сигнал/шум, кількості навчальних послідовностей та конфігурації антенної системи МІМО. На основі результатів чисельного моделювання буде здійснено оцінку похибок визначення відстані та координат мобільної станції у бездротових мережах Wi-Fi.

**Виклад основного матеріалу.** Оцінювання часу приходу сигналу є одним із ключових методів визначення відстані між мобільною станцією (MS) та точками доступу (AsP) у бездротових мережах (рис. 3). У багатопроменевому середовищі точність таких оцінок значною мірою залежить від можливості розділення окремих компонентів сигналу, що надходять із різними затримками. З використанням перетворення Фур'є математична модель каналу у частотній області може бути представлена у вигляді:

$$H(f) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \gamma_k e^{-j2\pi f \tau_k} \quad (5)$$

де  $\gamma_k$  – комплексні коефіцієнти загасання,  $\tau_k$  – затримки багатопроменевих компонент,  $L_p$  – кількість шляхів поширення.

При дискретизації за частотою та з урахуванням шумової складової  $\xi(n)$  з нульовим середнім та дисперсією  $\sigma_w^2$ , модель (5) може бути подана у векторній формі:

$$x_n = H_n + \xi_n \quad (6)$$

На основі отриманих вибірок формується автокореляційна матриця виду:

$$R_x(k) = \sum_{n=0}^{L-1} x_n^2 e^{j\frac{2\pi}{L}kn}, \quad (7)$$

спектральне розкладання якої дозволяє застосувати алгоритм MUSIC для оцінювання затримок багатопроменевих сигналів. Знаходження шуканих значень  $\tau_k$  здійснюється шляхом максимізації псевдоспектра:

$$P_{MUSIC}(\tau) = 1 / \mathbf{v}^T(\tau) \mathbf{R}_w \mathbf{v}(\tau) \quad (8)$$

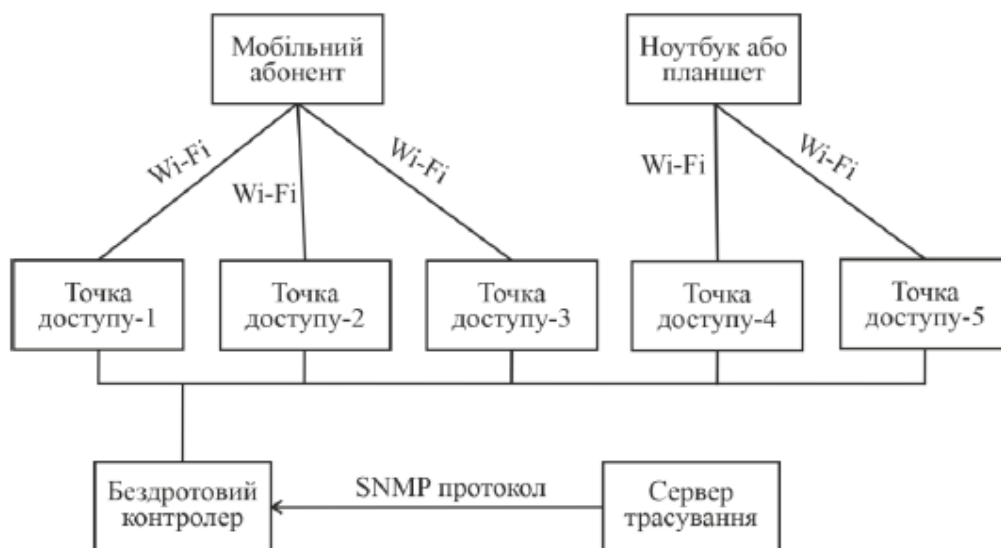


Рис. 3. Узагальнену структуру системи позиціонування в мережі абонентського доступу Wi-Fi: SNMP – Simple Network Management Protocol

де  $R_w$  – кореляційна матриця шумового підпростору,  $\mathbf{v}(\ddot{\text{A}})$  – вектор напрямку.

На рис. 4 представлено блок-схему приймача з високою часовою роздільною здатністю для оцінювання часу приходу сигналу.

На рис. 5 представлено структурну схему алгоритму оцінювання часу приходу сигналу з використанням MUSIC.

Рисунки 4 та 5 ілюструють взаємозв'язок між математичною моделлю оцінювання часу прибуття сигналу та її практичною реалізацією. Показано, як теоретичні співвідношення перетворюються на структурні схеми приймача та алгоритм обробки сигналів, зокрема з використанням методу MUSIC. Таким чином, наведені схеми демонструють апаратні та алгоритмічні етапи реалізації запропонованого підходу в мережах абонентського доступу Wi-Fi.

Після оцінювання відстаней між мобільною станцією та точками доступу задача позиціонування зводиться до геометричного визначення координат MS. У роботі використовується метод трилатерації, який передбачає наявність щонайменше трьох точок доступу, розміщених у відомих координатах.

Відстані між MS та відповідними точками доступу описуються рівняннями:

$$d_1^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2, \quad (9)$$

$$d_2^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2, \quad (10)$$

$$d_3^2 = (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2. \quad (11)$$

Після відповідних перетворень система рівнянь приводиться до лінійного вигляду (12), (13),

розв'язання якої дозволяє визначити координати мобільної станції.

$$2x_0(x_1 - x_3)^2 - 2y_0(y_1 - y_3)^2 = d_1^2 - d_3^2 - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (12)$$

$$2x_0(x_2 - x_3)^2 - 2y_0(y_2 - y_3)^2 = d_2^2 - d_3^2 - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \quad (13)$$

Додатково враховується модель втрат сигналу за рівнем:

$$U_d = U_{d_0} - 10n \lg d \quad (14)$$

де  $U_d$  – рівень прийнятого сигналу на відстані  $d$  від передавача, дБ;  $U_{d_0}$  – рівень сигналу на опорній відстані (звичайно  $d_0 = 1\text{ м}$ ), дБ;  $n$  – показник загасання середовища поширення, який залежить від типу середовища та умов розповсюдження сигналу;  $d$  – відстань між передавачем і приймачем, м.

На рис. 6 представлена блок-схема обробки каналу та визначення координат мобільної станції на основі трилатерації.

Для оцінювання ефективності запропонованого підходу було проведено чисельне моделювання каналу передавання даних з урахуванням умов функціонування мереж Wi-Fi 6/Wi-Fi 6E.

Блок-схема на рис. 6 ілюструє послідовність обробки сигналу для визначення координат мобільної станції на основі трилатерації. Сигнал генерується передавальним блоком та проходить через канал передачі, після чого виконується виявлення пакета даних і синхронізація. Далі застосовуються процедури демодуляції тренувального поля та оцінювання характеристик каналу, що

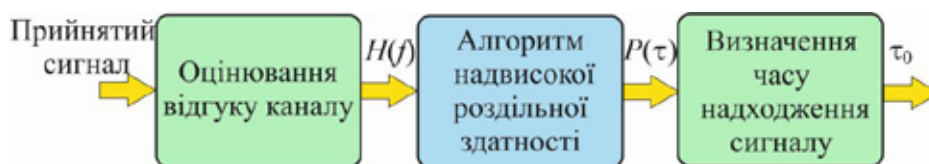


Рис. 4. Блок-схема приймача з високою часовою роздільною здатністю

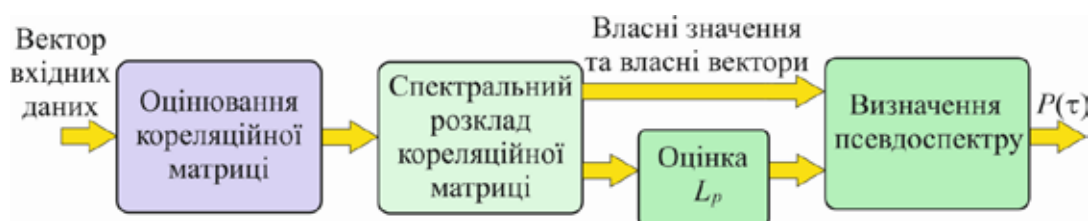
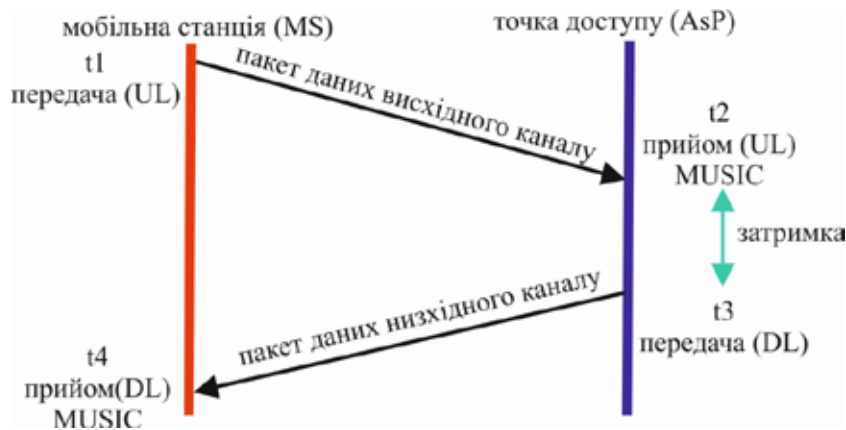


Рис. 5. Структурна схема алгоритму оцінювання часу приходу сигналу з використанням MUSIC





Рис. 6. Блок-схема обробки сигналу та визначення координат мобільної станції на основі трилатерації

Рис. 7. Сема що ілюструє особливості зондувальних вимірювань між MS та As:  
UL – висхідний канал; DL – низхідний канал

дозволяє визначити довжину траєкторії сигналу. На завершальному етапі, використовуючи отримані часові та амплітудні оцінки, здійснюється визначення місцезнаходження абонента, що забезпечує точне позиціонування у просторі.

Моделювання виконувалося для мережі, організованої відповідно до умов функціонування мереж Wi-Fi 6/Wi-Fi 6E, яка включала мобільну станцію (MS) та кілька точок доступу (AsP). Для однозначного визначення положення MS необхідна наявність щонайменше трьох точок доступу. Процедура імітаційного моделювання передбачала обмін вимірюваннями дальності під час виявлення MS, після чого на основі отриманих результатів здійснювалася трилатерація положення мобільної станції відповідно до рівнянь (9–11). Загалом моделювання проводилося у вигляді серії ітерацій з урахуванням співвідношення сигнал/шум. На рис. 7 наведено схему, що ілюструє особливості зондувальних вимірювань між MS та AsP.

Оцінювання часу приймання–передавання сигналу виконувалося за виразом (див. рис. 7):

$$T_E = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) \quad (15)$$

Після цього відстань між MS і AsP визначається за формулою:

$$d = T_E / 2 \cdot \vartheta_c \quad (16)$$

де  $\vartheta_c$  – швидкість поширення електромагнітної хвилі у середовищі (м/с).

Отже у випадку застосування методології MUSIC послідовно виконуються такі етапи:

- 1) Інтерполяція піднесучих у частотній області за умови їх рівномірного розміщення;
- 2) Обчислення кореляційної матриці (див. формулу (7));
- 3) Декореляція впливів багатопроменевих приймань із використанням методу просторового згладжування;
- 4) Усереднення кореляційної матриці;
- 5) Спектральний розклад кореляційної матриці з формуванням підпросторів сигналу та шуму, а також оцінювання профілю затримок на основі сукупності вимірних реалізацій;
- 6) Визначення часу поширення затримок сигналу на підставі положення піків у доступному багатопроменевому профілі.

На рис. 8 представлена частотна передавальна характеристика каналу. На рис. 9 представлена

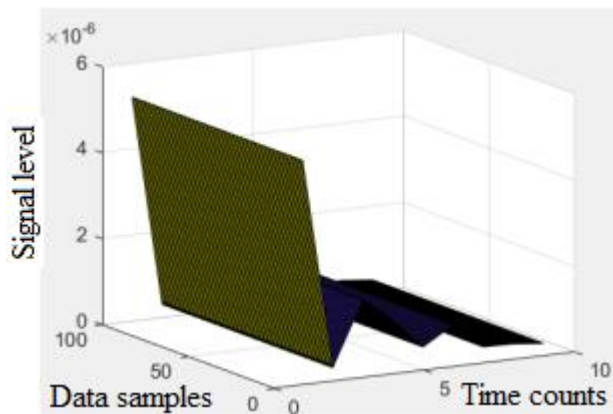


Рис. 8. Частотна передавальна характеристика каналу

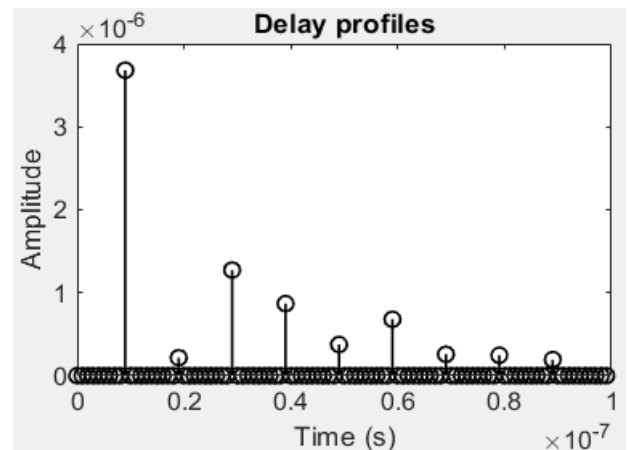


Рис. 9. Імпульсна характеристика каналу зв'язку

імпульсна характеристика каналу зв'язку. Просторові характеристики коефіцієнтів каналу представлено на рис. 10.

Програмна оцінка характеристик каналу зв'язку наведена на рис. 11. На основі експериментальних результатів на рис. 12 наведено порівняння оціненого профілю затримок, отриманого методом MUSIC у процесі моделювання каналу Wi-Fi, та реального профілю багатопроменевого поширення. Загалом, ефективність позиціонування в частотному діапазоні нижче 6 ГГц (міліметровий діапазон) досягається з використанням наявної інформації про формування променя (beamforming) [12].

На рис. 13 показано результати просторового позиціонування мобільної станції на основі трилатерації з використанням кількох точок доступу.

Пунктирні кола на рис. 13 відповідають областям можливого розташування MS, визначеним за виміряними відстанями до окремих точок

доступу, тоді як їх перетин формує оцінене положення станції. Порівняння реального положення MS з оціненим свідчить про високу точність локалізації, що підтверджує коректність оцінювання профілю затримок каналу та ефективність застосованого алгоритму. Незначне відхилення між реальним та оціненим положенням зумовлене впливом багатопроменевого поширення та похибками вимірювання часу проходження сигналу, однак у цілому отримані результати демонструють працездатність запропонованого підходу для задач позиціонування в бездротових мережах Wi-Fi.

Для оцінювання точності позиціонування було сформовано кумулятивну функцію розподілу абсолютної похибки визначення відстані, отриману на основі результатів вимірювань дальності для всіх ітерацій моделювання та всіх пар «AsP–MS». Визначення положення мобільної станції здійснювалося методом трилатерації з викорис-

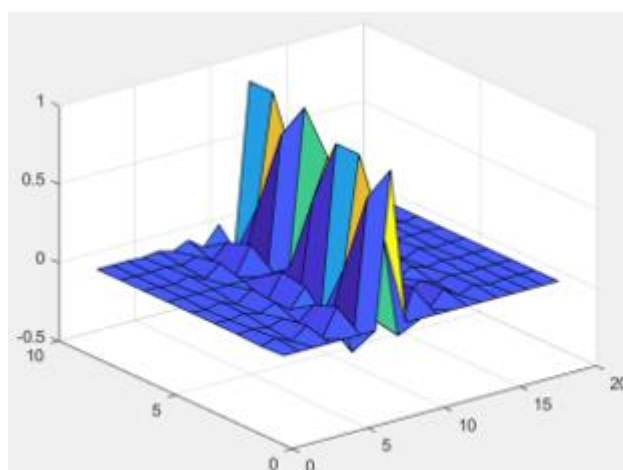


Рис. 10. Просторові характеристики коефіцієнтів каналу

```

SampleRate: 1.0000e+09
DelayProfile: 'Model-B'
ChannelBandwidth: 'CBW20'
CarrierFrequency: 5.2500e+09
EnvironmentalSpeed: 0.0890
TransmitReceiveDistance: 3
NormalizePathGains: true
UserIndex: 0
TransmissionDirection: 'Downlink'
NumTransmitAntennas: 4
TransmitAntennaSpacing: 0.5000
NumReceiveAntennas: 2
ReceiveAntennaSpacing: 0.5000
LargeScaleFadingEffect: 'Pathloss'
NumPenetratedFloors: 4
NumPenetratedWalls: 0
WallPenetrationLoss: 5
NormalizeChannelOutputs: true
ChannelFiltering: true

```



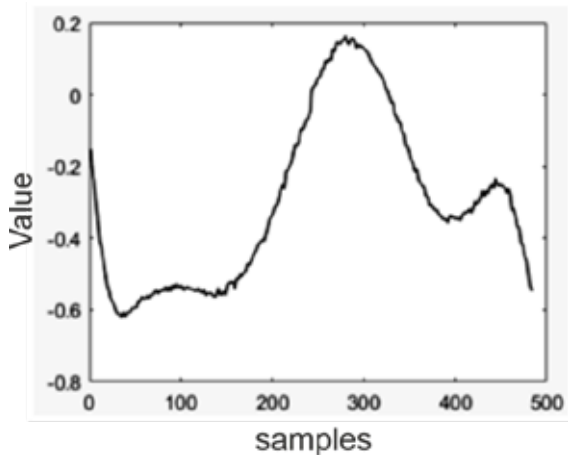


Рис. 11. Характеристики каналу зв'язку, отримані шляхом програмної оцінки

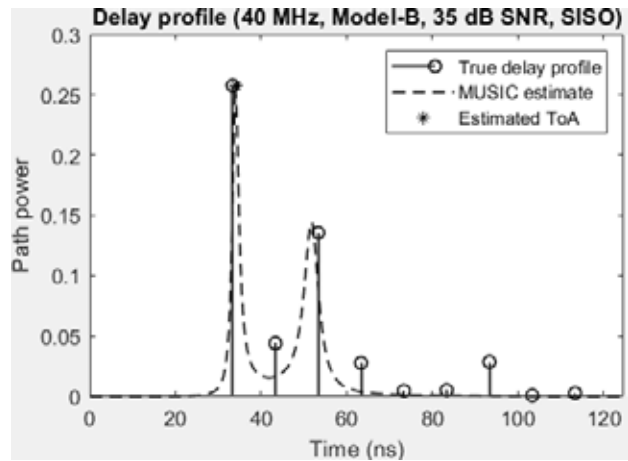


Рис. 12. Оцінювання профілю затримок каналу за допомогою методу MUSIC

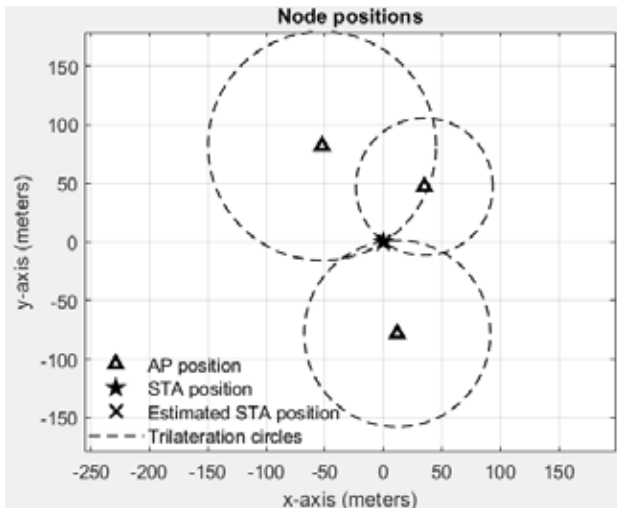


Рис. 13. Результати просторового позиціонування мобільної станції

танням оцінених відстаней, після чого ітеративно обчислювалася середньоквадратична похибка (RMS) оцінки координат MS. На рис. 14 наведено експериментальну залежність середньої абсолютної похибки визначення положення, отриману за результатами ітеративного моделювання вимірювань дальності для всіх пар «AsP–MS» за різних значень співвідношення сигнал/шум. На рис. 15 наведено залежність цієї похибки від рівня співвідношення сигнал/шум, що дозволяє проаналізувати вплив умов приймання на точність локалізації.

На рис. 16 та 16 представлено результати оцінювання похибки дальності. Тут використаний механізм Long Training Field (LTF) тобто навчальних послідовностей фізичного рівня стандартів IEEE 802.11, які використовуються для оцінювання каналу, синхронізації та вимірювання

параметрів сигналу. Ми використали LTF для підвищення точності позиціонування шляхом зміни частоти його повторення, що дало змогу зменшити похибку визначення дальності та координат мобільної станції. Щоб оцінити вплив LTF на якість позиціонування, було змінено частоту його повторення. Дослідження показують, що похибка визначення дальності для MS має тенденцію до зменшення зі зростанням частоти LTF (див. рис. 16).

При визначенні залежність функції розподілу ймовірності (рис. 16) під кількістю полів HE-LTF розуміється число тренувальних символів у преамбулі кадру, які використовуються для оцінювання каналу та визначення часової затримки сигналу. Зі збільшенням кількості HE-LTF підвищується точність оцінки каналу, що приводить до зменшення похибки визначення дальності як ми бачимо з рисунку. Крім того, як видно з рис. 16 кумулятивна функція розподілу (CDF) відображає ймовірність того, що абсолютна похибка позиціонування не перевищує заданого значення. Використання CDF у кумулятивному форматі дало можливість наочно порівнювати ефективність різних конфігурацій системи за рівнем досяжної точності.

На рис. 17 представлено дослідження впливу конфігурацій MIMO на точність позиціонування шляхом порівняння кумулятивних функцій розподілу абсолютної похибки для різної кількості передавальних і приймальних антен. Отримані результати показують, що зі збільшенням розмірності MIMO-системи істотно зменшується похибка визначення координат, що зумовлено підвищенням просторового рознесення та якості оцінки каналу. Таким чином, використання бага-

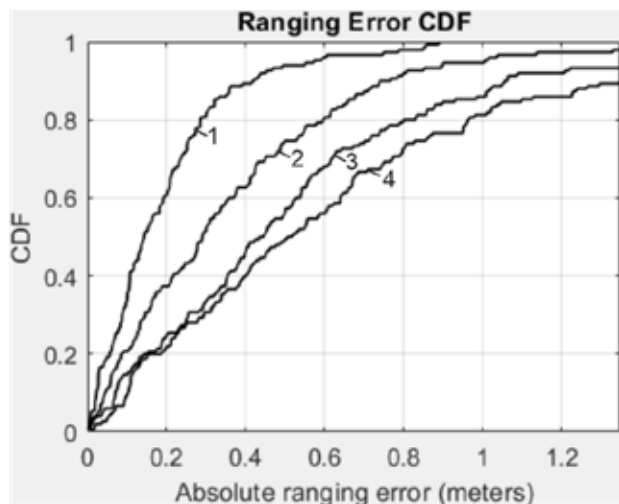


Рис. 14. Залежність функції щільності ймовірності від абсолютної похибки позиціонування для 50 ітерацій: 1 –  $C/\text{Ш} = 40$  дБ; 2 –  $C/\text{Ш} = 30$  дБ; 3 –  $C/\text{Ш} = 20$  дБ; 4 –  $C/\text{Ш} = 10$  дБ

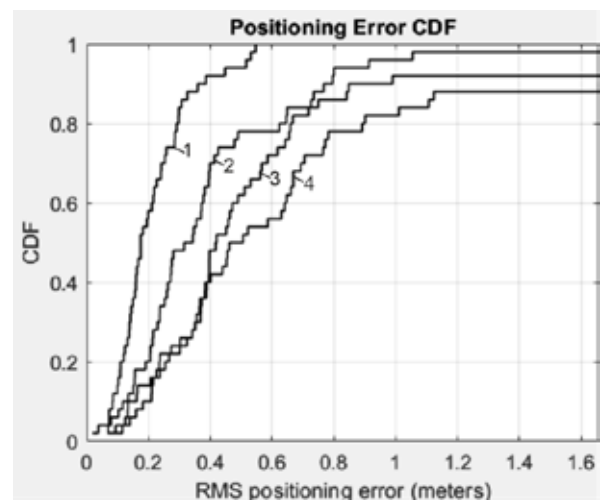


Рис. 15. Залежність функції щільності ймовірності від середньоквадратичної похибки позиціонування: 1 –  $C/\text{Ш} = 40$  дБ; 2 –  $C/\text{Ш} = 30$  дБ; 3 –  $C/\text{Ш} = 20$  дБ; 4 –  $C/\text{Ш} = 10$  дБ

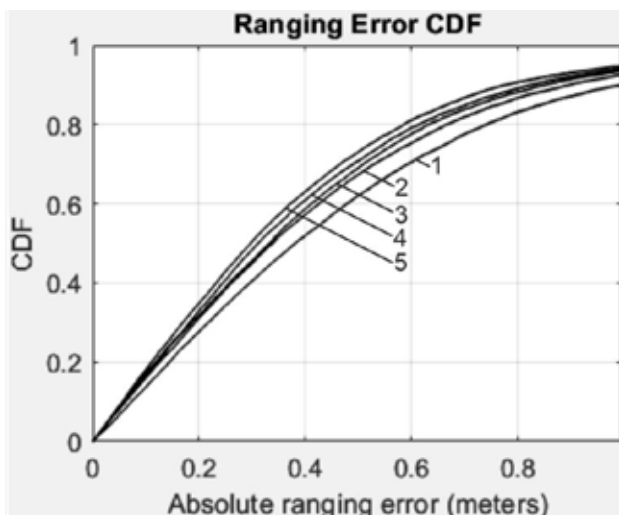


Рис. 16. Залежність функції розподілу ймовірності (у кумулятивному форматі) від абсолютної похибки визначення місцезнаходження MS: 1 – 1 поле HE-LTF; 2 – 2 поля HE-LTF; 3 – 3 поля HE-LTF; 4 – 4 поля HE-LTF; 5 – 5 полів HE-LTF

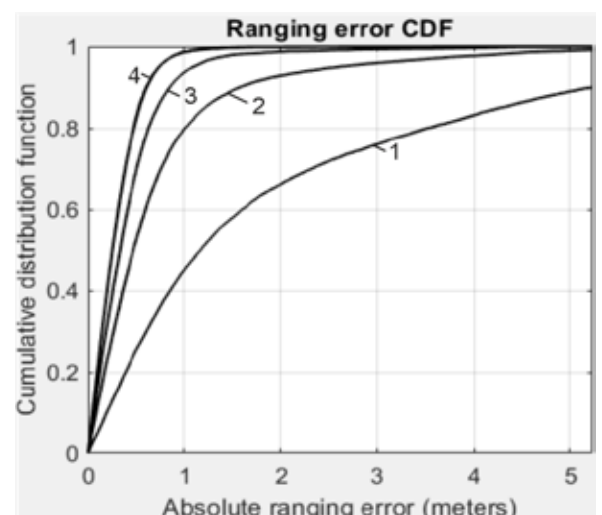


Рис. 17. Залежність функції щільності ймовірності від абсолютної похибки позиціонування для різної кількості передавальних і приймальних антен: 1 –  $1 \times 1$ ; 2 –  $2 \times 2$ ; 3 –  $2 \times 3$ ; 4 –  $3 \times 3$

токанальних конфігурацій є ефективним засобом підвищення точності позиціонування.

На рис. 18 та рис. 19 показано залежність точності Wi-Fi-позиціонування від відношення сигнал/шум при оцінюванні середньої абсолютної похибки та середньоквадратичної (RMS) похибки визначення координат. Видно, що зі зростанням відношення сигнал/шум обидва показники похибки монотонно зменшуються, що свідчить про підвищення надійності та точності позиціонування в кращих умовах радіоканалу.

Отримані результати показують чітку залежність точності Wi-Fi-позиціонування від відно-

шення сигнал/шум, а саме зі зростанням рівня сигнал/шум як середня абсолютна похибка, так і RMS-похибка визначення координат суттєво зменшуються. Це підтверджує, що за сприятливих умов радіоканалу Wi-Fi-системи здатні забезпечувати високу точність позиціонування, достатню для практичних застосувань. Такі результати є особливо корисними для перспективних рішень у сфері моніторингу активів на підприємствах, відстеження персоналу та обладнання, логістики, розумних фабрик, а також для навігації мобільних роботів і автономних платформ у приміщеннях тобто для 6G сценаріїв, де потрібне надійне та

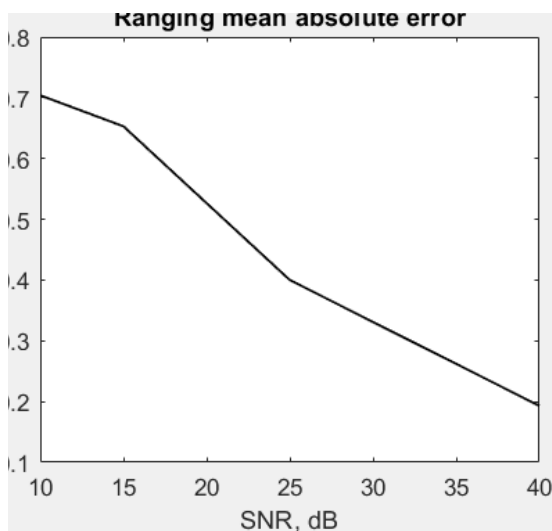


Рис. 18. Оцінювання середньої абсолютної похибки

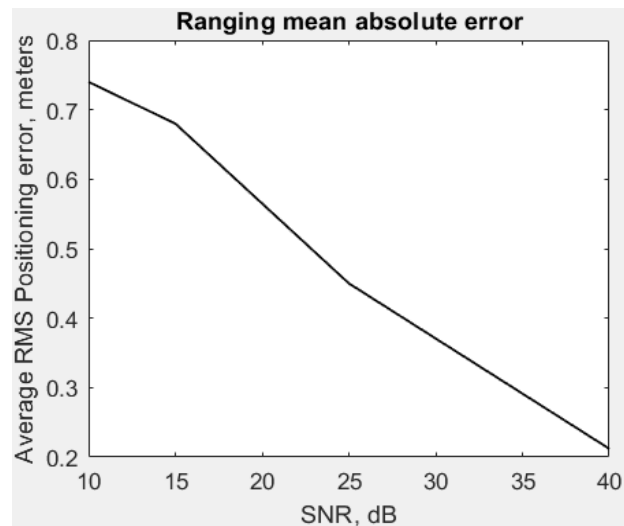


Рис. 19. Оцінювання середньоквадратичної (RMS) похибки

недороге рішення без використання спеціалізованої інфраструктури.

**Висновки.** У запропонованій роботі представлено результати дослідження методів високоточного позиціонування мобільних станцій у мережах абонентського доступу Wi-Fi 6/6E на основі оцінювання часу прибуття сигналів. Проведено аналіз сучасних підходів до локалізації, зокрема методів ToF, AoA/AoD та алгоритмів надвисокої роздільності, і обґрунтовано доцільність їх застосування в умовах багатопроменевого поширення сигналів.

Запропоновано та досліджено підхід до визначення координат абонентської станції із використанням алгоритму MUSIC для оцінювання часових затримок у поєднанні з процедурою FTM стандарту IEEE 802.11az. На основі результатів чисельного моделювання показано, що застосування методів надвисокої роздільності дозволяє істотно зменшити похибку визначення відстані та координат у порівнянні з класичними кореляційними підходами, особливо за складних умов багатопроменевості та низького відношення сигнал/шум.

Окрему увагу приділено аналізу впливу навчальних послідовностей HE-LTF на точність визначення відстані. Встановлено, що зі збільшенням кількості полів HE-LTF у преамбулі кадру підвищується якість оцінки каналу, що приводить

до зменшення похибки визначення відстані та покращення точності позиціонування мобільної станції. Це підтверджено результатами аналізу кумулятивних функцій розподілу похибки.

Досліджено також вплив конфігурацій MIMO на ефективність позиціонування. Показано, що збільшення кількості передавальних і приймальних антен забезпечує зростання просторового рознесення та покращення оцінки параметрів каналу, що безпосередньо приводить до зменшення середньоквадратичної та абсолютної похибок локалізації. Отримані результати підтверджують доцільність використання багатоканальних антенних систем у задачах високоточного Wi-Fi позиціонування.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проєктуванні та модернізації реальних мереж абонентського доступу, орієнтованих на сервіси внутрішньої навігації, моніторингу присутності користувачів, автоматизації виробничих процесів, систем безпеки та управління ресурсами в «розумних» будинках і промислових IoT-середовищах. Запропонований підхід може бути інтегрований у перспективні рішення стандартів Wi-Fi 6/6E/7 без істотного ускладнення апаратної частини, що робить його привабливим для практичного впровадження у сучасних системах бездротового доступу.

#### Список літератури:

1. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L., Kasslin M., Doppler K. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax. *IEEE Communications Magazine*. 2019. Vol. 57. № 9. Pp. 113–119. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338>.

2. Бойко Ю. М., Пятін І. С. Визначення продуктивності LDPC кодів засобами HDL в системах зв'язку технології Wi-Fi 6. *Вчені записки*. 2024. Т. 35 (74). № 1. С. 19–26. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/03>.
3. Kunthoth J., Karkar A., Al-Maadeed S., et al. Indoor positioning and wayfinding systems: a survey. *Human-centric Computing and Information Sciences*. 2020. Vol. 10. Article 18. <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00222-0>.
4. Kawecki R., Hausman S., Korbel P. Performance of Fingerprinting-Based Indoor Positioning with Measured and Simulated RSSI Reference Maps. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. № 9. Article 1992. <https://doi.org/10.3390/rs14091992>.
5. Dai J., Wang M., Wu B., Shen J., Wang X. A Survey of Latest Wi-Fi Assisted Indoor Positioning on Different Principles. 2023. *Sensors*. Vol. 23, No. 18. Art. 7961. <https://doi.org/10.3390/s23187961>.
6. Boiko J., Druzhynin V., Pyatin I., Karpova L. Software Modeling and Implementation of Information Network for Smart Home Technology. 2024. *CEUR Workshop Proceedings*. Vol. 3909. P. 296–310. Available online: [https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper\\_24.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper_24.pdf).
7. Bahl P., Padmanabhan V. N. RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System. *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications: Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Tel Aviv, 26–30 March 2000)*. Israel, 2000, Vol. 2, Pp. 775–784. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2000.832252>.
8. Gu Y., Lo A., Niemegeers I. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks. 2009. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 11, No. 1. P. 13–32. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090103>.
9. Dardari D., Conti A., Fener U., Giorgetti A., Win M. Z. Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments. 2009. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 97, No. 2. P. 404–426. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008846>.
10. Zhao B., Hu K., Gong Y., Shen Y. A Tensor-Based Joint AoA and ToF Estimation Method for Wi-Fi Systems. 2021. *IEEE Wireless Communications Letters*. Vol. 10, No. 11. P. 2543–2546. <https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3106699>.
11. Boquet G., Boquet-Pujadas A., Pisa I., Dabak A., Vilajosana X., Martinez B. Indoor Position Estimation Using Angle of Arrival Measurements: An Efficient Multi-Anchor Approach With Outlier Rejection. 2024. *Internet of Things*. Vol. 26. Art. 101236. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101236>.
12. Бойко Ю., Пятін І., Гавронський В., Коротун М. Моделювання процесу розгортки променя під час початкового доступу в мережах 5G NR. 2025. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. Т. 359, № 6.1. С. 70–75. <https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/20291>.

#### **Boiko J.M., Pyatin I.S., Eromenko O.I. A HIGH-ACCURACY POSITIONING METHODOLOGY FOR WI-FI 6/6E ACCESS NETWORKS BASED ON TIME-OF-ARRIVAL ESTIMATION**

*The rapid development of subscriber access networks based on Wi-Fi technologies, particularly Wi-Fi 6 and Wi-Fi 6E (IEEE 802.11ax/az), has enabled the emergence of new context-aware services, among which high-precision positioning of subscriber stations in indoor and dense urban environments plays a key role. The relevance of this research is determined by the need to improve positioning accuracy in Wi-Fi networks operating under multipath propagation conditions and limited signal-to-noise ratio, which are typical for real deployment scenarios of subscriber access networks.*

*This paper focuses on positioning techniques based on Time of Arrival (ToA) estimation using Fine Timing Measurement procedures introduced in the IEEE 802.11az standard and ultra-high-resolution signal processing algorithms. A method for estimating the distance between a mobile station and access points is proposed, which is based on mathematical modeling of a multipath wireless channel and the application of the MUSIC (Multiple Signal Classification) algorithm for precise estimation of individual signal path delays. The use of frequency-domain channel response sampling enables the formation of a correlation matrix, whose eigenstructure is exploited to separate closely spaced multipath components and enhance temporal resolution.*

*Numerical simulations were conducted to evaluate the performance of the proposed approach under Wi-Fi 6/6E operating conditions. Subscriber station coordinates were determined using trilateration based on the estimated distances to multiple access points. The impact of key system parameters, including signal-to-noise ratio, the number of HE-LTF training fields, and MIMO antenna configurations, on distance estimation accuracy and overall positioning error was thoroughly analyzed. The simulation results demonstrate that increasing the number of training fields and antenna elements significantly improves delay estimation accuracy and reduces positioning error.*

*The obtained results confirm that the integration of ultra-high-resolution algorithms with physical layer training sequences provides a substantial improvement in positioning accuracy compared to conventional*

*methods. The proposed approach is shown to be effective and practically feasible for implementation in modern and next-generation Wi-Fi subscriber access networks, enabling reliable indoor navigation, user activity monitoring, and location-based services for industrial IoT and smart infrastructure applications.*

**Keywords:** *Wi-Fi 6/6E, subscriber positioning, Time of Arrival, MUSIC algorithm, trilateration, multipath channel, MIMO systems.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Воловик А.Ю.**

<https://orcid.org/0000-0002-8772-9843>

Вінницький національний технічний університет

**Ніколенко М.С.**

<https://orcid.org/0009-0007-0110-2964>

Вінницький національний технічний університет

## ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ У ПРИСУТНОСТІ НЕСПРАВНОСТЕЙ КАНАЛУ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Методи оцінювання станів динамічних систем знайшли широке застосування в різних галузях прикладних досліджень. Найбільш відомим з них є метод фільтра Калмана в якому інформаційним джерелом для корекції оцінок є результати спостережень сенсорної підсистеми, а індикатором коректної роботи схеми оцінювання є інноваційний процес. Для номінального режиму роботи, останній, є гаусовим некорельованим випадковим процесом, що має нульове середнє значення і апріорно обчислювальну коваріаційну матрицю. У разі появи раптових несправностей або структурно невизначених збурень у сенсорної підсистеми зазначені умови порушуються. Метою представленої роботи є розробка методу, що дозволяє відновити нормальну працездатність фільтра Калмана за визначених умов. Поставлена мета досягається шляхом застосування спеціального взаємодозначного перетворення рівняння виходу досліджуваної системи, внаслідок чого складова збурень поглинається в рівнянні екстраполяції вектора стану динамічної системи. Застосовані для рішення поставленої задачі припущення збігаються з тими, які зазвичай приймаються в класичній теорії лінійної фільтрації, при цьому збурення мають абсолютно довільний характер, не підлягають ймовірнісному опису та не мають верхньої межі обмеженості. Для забезпечення коректності розв'язку поставленої задачі формуються припущення, які стосуються обмеженості системних матриць, що дозволяє уникнути невизначених рішень. На наступному етапі, до скоректованої системи застосовується певним чином модифікований фільтр Калмана. Значна увага приділена аналізу властивостей отриманого фільтра, що стосуються стійкості помилок оцінювання. Функціональна працездатність запропонованого методу була підтверджена шляхом статистичного моделювання на тестовому прикладі лінійної динамічної системи третього порядку. На відміну від інших відомих методів проектування, запропонований метод характеризується відносно простим алгоритмом та реалізацією, а перевірка умов існування рішення не потребує занадто складних процедур, що робить його практично зручним для застосування.

**Ключові слова:** оптимальне оцінювання стану на фоні несправностей, лінійні динамічні системи, фільтр Калмана, збурення з невизначеною структурою.

**Постановка проблеми.** Оцінювання станів динамічних систем знайшло широке застосування в різних галузях практичної діяльності, наприклад, в аерокосмічних додатках, діагностиці несправностей технічних систем, в системах автоматичного управління, в хіміко-технологічних системах з метою контролю якості продукції, що випускається, тощо. Актуальність проблеми отримання оцінок станів лінійних динамічних систем, вільних від впливу структурно невизначених збурень, підтверджується її значенням для багатьох прикладних досліджень,

зокрема у галузі функціональної діагностики, де точність оцінювання визначає ефективність діагностичних процедур.

Найбільш відомими і традиційно використовуваними класичними методами оцінювання станів в подібних випадках є методи фільтра Калмана і спостерігачів Люенбергера. В цих алгоритмах інформаційним джерелом для корекції оцінок є результати спостережень сенсорної підсистеми, а індикатором коректної роботи схеми оцінювання є інноваційний процес. Для номінального режиму роботи, останній, є гаусовим некорельованим

випадковим процесом, що має нульове середнє значення і апріорно обчислювальну коваріаційну матрицю. У разі появи раптових несправностей або структурно невизначених збурень у сенсорної підсистеми зазначені умови порушуються, а адекватність оцінок загально прийнятих алгоритмів стає сумнівною, малоефективною і, при певних умовах, призводить до втрати алгоритмічної стійкості. Сформульовані факти породжують науково-технічну проблему, яка полягає у необхідності розвитку методів, що дозволяють відновлювати нормальну працездатність фільтра Калмана за визначених умов. В дному дослідженні задачу вирішено введенням взаємо-однозначного перетворення рівняння виходу, яке поглинає збурення на етапі екстраполяції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день, відомі досягнення в теорії оцінювання припускають, що в будь-яку несправність або збурення доцільно інтерпретувати у вигляді додаткових невідомих входів в подальшому які, або підлягають оцінюванню або, за для подолання впливу, відокремлюється від алгоритму безпосереднього оцінювання. Загалом, дослідження, присвячені оцінюванню станів у присутності несправностей та збурень із невизначеною структурою, мають тривалу історію розвитку, яка простягається до сучасного етапу [1–4]. Мета подібних досліджень полягала в розробці методів отримання оцінок станів, вільних від впливів збурюючих входів. Стійкість отриманих оцінок гарантувалася за рахунок введення додаткових обмежень у вигляді матричних нерівностей, що стосуються, в основному, системних матриць. Як правило, вільні ресурси, що залишаються після задоволення зазначених нерівностей, прийнято використовувати для цілей оптимізації [4, 5].

У ряді інших робіт [6–8] розгляду підлягали стохастичні лінійні системи з невизначеними збурюючими входами, де оптимізація здійснювалася шляхом мінімізації сліду коваріаційної матриці помилок оцінювання. При цьому такому важливому питанню, як стійкість отриманих рішень щодо помилок оцінювання, не завжди приділялася належна увага. Крім того, слід зауважити, що досить великий клас нелінійних систем можна звести до розгляду лінійних систем із змінними або постійними параметрами шляхом відповідної апроксимації нелінійних залежностей. З цих причин вивчення лінійних систем з вищевказаних позицій, ще досі залишається активним полем дослідницької діяльності [9–11].

**Постановка завдання.** Мета представленої роботи полягає в розробці методу отримання оцінок станів лінійної дискретної стохастичної системи на фоні несправностей або структурно невизначених збурень у каналі спостереження. В основу методу покладено ідею поглинання вище вказаних небажаних явищ шляхом введення взаємо-однозначного перетворення рівнянь виходу системи і подальшого застосування модифікованого методу фільтра Калмана.

У структурному відношенні робота сформована таким чином, що її зміст послідовно розкриває основні етапи дослідження: у розділі 2 сформульовано постановку задачі в математичному сенсі; у розділі 3 розглядається взаємо-однозначне математичне перетворення виходу початкової системи, призначене для поглинання збурень у вихідних даних; результати застосування методу Калмана до перетвореної системи обговорюються в розділі 4, а в наступних розділах наведені результати моделювання, підведені підсумки дослідження та список використаної літератури.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо лінійну дискретну стохастичну систему математична модель, яка допускає опис в термінах змінних стану

$$\mathbf{s}_{k+1} = \mathbf{W}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{D}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{n}_k; \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \xi_k \quad (2)$$

де  $\mathbf{s}_k \in \mathbb{R}^n$  – поточний стан системи,  $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^m$  – вектор виходу,  $\mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^p$  – точно відомий керуючий вплив,  $\mathbf{d}_k \in \mathbb{R}^q$  – несправності або збурення з невизначеною структурою,  $\mathbf{n}_k \in \mathbb{R}^n$  – шум стану,  $\xi_k \in \mathbb{R}^m$  – шум виходу системи,  $\mathbf{W}_k, \mathbf{G}_k, \mathbf{D}_k, \mathbf{H}_k$  – відомі системні матриці, відповідних розмірностей. Початковий стан  $\mathbf{s}_0 \in \mathbb{R}^n$  являє собою гаусів випадковий вектор із середнім значенням  $\bar{\mathbf{s}}_0$  і позитивно визначеною коваріаційною матрицею  $\mathbf{P}_0$ . Випадкові послідовності  $\mathbf{n}_k, \xi_k$  є незалежними білими гаусовими шумами, некорельованими з  $\mathbf{s}_0$ , мають нульові середні значення і обмежені коваріаційні матриці  $E\{\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^T\} = \mathbf{Q}_k$  і  $E\{\xi_k \xi_k^T\} = \mathbf{R}_k$ , відповідно. Перераховані припущення збігаються з тими, які зазвичай приймаються в класичній теорії лінійної фільтрації без урахування матриці  $\mathbf{D}_k$ , яка там відсутня. Незважаючи на те, що шуми  $\mathbf{n}_k, \xi_k$  є випадковими процесами, передбачається, що збурення  $\mathbf{d}_k$  абсолютно довільні, не мають ні ймовірнісного опису, ні навіть обмеженості зверху. Однак для розв'язності поставленої задачі вводяться припущення: послідовність матриць



$\mathbf{H}_{k+1}\mathbf{D}_k$  повинна бути обмеженою;  $q \leq t$  тобто число збурень не більше числа вихідних сенсорів; для всіх  $k = 0, 1, 2, \dots$ , найменше сингулярне значення матричного добутку  $\mathbf{H}_{k+1}\mathbf{D}_k$  не менше  $\gamma$ , де  $\gamma$  – задане додатне число.

Останні два обмеження по суті означають, що матричний добуток  $\mathbf{H}_{k+1}\mathbf{D}_k$  має повний ранг по стовпцях, і вони необхідні для здійснення процедури поглинання збурень. Завдання полягає в розробці методу оцінювання вектора стану  $\mathbf{s}_k$ , вільного від впливу збурень  $\mathbf{d}_k$ , виходячи з доступності результатів спостережень  $\mathbf{y}_k$ , послідовності точно відомих керуючих впливів  $\mathbf{u}_k$  і системних матриць  $\mathbf{W}_k, \mathbf{G}_k, \mathbf{D}_k, \mathbf{H}_k$ . У теорії оптимальної лінійної фільтрації стійкість фільтра Калмана гарантується введенням припущень про керованість і спостережуваність досліджуваної системи [13, 14]. Аналогічні умови будуть сформульовані і для розглянутого випадку після того, як буде здійснена процедура поглинання збурень.

*Обґрунтування взаємно-однозначного перетворення виходу системи.* У цьому розділі переслідується локальна мета, а саме обґрунтування процедури поглинання складової в рівнянні стану системи шляхом введення відповідного перетворення рівняння виходу таким чином, щоб згодом стало можливим застосування фільтра Калмана, вільного від впливу збурень. Подібне завдання вперше було розглянуто в роботі [15], а більш сучасна інтерпретація подана в [16, 17]. У зазначених дослідженнях структура лінійного фільтра визначалася рівнянням, що слугувало основою для подальшого розвитку методів оцінювання станів систем

$$\hat{\mathbf{s}}_{k+1|k+1} = \mathbf{W}_k \hat{\mathbf{s}}_k + \mathbf{L}_k [\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{W}_k \hat{\mathbf{s}}_k]. \quad (3)$$

У цьому рівнянні складова  $\mathbf{H}_{k+1}\mathbf{D}_k$  не враховувалася, оскільки вона – величина, яка точно відома і для задачі синтезу оптимального лінійного фільтра є несуттєвою. Матриця передачі фільтра  $\mathbf{L}_{k+1}$  визначалася в результаті вирішення задачі мінімізації по відношенню до коваріаційної матриці помилок оцінювання за умови, що справедливо введене обмеження

$$\mathbf{L}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{D}_k - \mathbf{D}_k = 0. \quad (4)$$

Це гарантувало відсутність впливу складової на помилку оцінювання стану. Розв'язання задачі локальної оптимізації з урахуванням (4) призвело до істотного ускладнення процесу обчислення матриці передачі  $\mathbf{L}_{k+1}$  порівняно з класичним фільтром Калмана, і було не зовсім очевидно як аналізувати стійкість синтезованого фільтра. Тому

в даній статті основна увага приділена питанню поглинання збурення ще до процесу проектування фільтра, а на другому етапі проводиться синтез потрібного фільтра в припущенні складової збурення в рівнянні стану (1).

Припустимо, що існує якась обмежена матрична послідовність, конкретний вигляд якої буде визначений дещо пізніше. Тоді з співвідношення (2) безпосередньо випливає

$$\mathbf{M}_k [\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{s}_{k+1} - \mathbf{n}_{k+1}] = 0. \quad (5)$$

Далі додаймо до кожної сторони рівняння (5) рівняння (1)

$$\mathbf{s}_{k+1} = \mathbf{W}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{D}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{n}_k + \mathbf{M}_{k+1} [\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{s}_{k+1} - \mathbf{n}_{k+1}]. \quad (6)$$

Після приведення подібних членів отримуємо вираз, в якому рівняння виходу участі вже не приймає:

$$\mathbf{s}_{k+1} = \mathbf{Z}_{k+1} [\mathbf{W}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{D}_k \mathbf{d}_k] + \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{y}_{k+1} + \mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{n}_k - \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{n}_{k+1} \quad (7)$$

де  $\mathbf{Z}_{k+1} \triangleq [\mathbf{I}_n - \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}]$ .

Якщо матрична послідовність  $\mathbf{M}_{k+1}$  обрана таким чином, щоб в кожен момент часу  $k$  виконується обмеження  $\mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{D}_k = 0$ , тоді рівняння (7) прийме вигляд:

$$\mathbf{s}_{k+1} = \mathbf{W} \mathbf{s}_k + \mathbf{G} \mathbf{u}_k + \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{y}_{k+1} + \mathbf{w}_k, \quad (8)$$

де  $\mathbf{W} \triangleq \mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{W}_k$ ;  $\mathbf{G} \triangleq \mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{G}_k$ ;

$\mathbf{w}_k \triangleq \mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{n}_k - \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{n}_{k+1}$ .

При цьому коваріаційна матриця перетвореного шуму стану  $\mathbf{w}_k$  повинна обчислюватися за формулою

$$\mathbf{Q} \mathbf{1}_k \triangleq \mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{Q}_k \mathbf{Z}_{k+1}^T + \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{R}_k \mathbf{M}_{k+1}^T. \quad (9)$$

Звернувшись до рівняння (8) неважко помітити, що тепер збурюючий вплив  $\mathbf{D}_k \mathbf{d}_k$  у явній формі виключений з подальших перетворень. На даному етапі важливим є те, що поглинання збурення здійснюється в момент  $k+1$  замість моменту часу  $k$ . Умова, якій повинна задовольняти матриця передачі розглянутого фільтра  $\mathbf{M}_{k+1}$  подібно до тієї, яка була введена в роботі [12], а саме  $\mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{D}_k = [\mathbf{I}_n - \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}] \mathbf{D}_k = 0$ . Однак тут є істотна відмінність – вираз у квадратних дужках, надає більше ступенів свободи у виборі величини матричного коефіцієнта передачі  $\mathbf{M}_{k+1}$ , оскільки він не пов'язаний з вирішенням задачі мінімізації. Цю матрицю можна визначити в результаті вирішення матричного рівняння  $\mathbf{M}_{(k+1)} \mathbf{H}_{(k+1)} \mathbf{D}_k = \mathbf{D}_k$ . Оскільки передбачається справедливості припущення, що в матричному добутку  $\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{D}_k$  кількість стовпців не перевищує кількість рядків, то

це означає, що рішення для  $\mathbf{M}_{k+1}$  повинно існувати. У більшості практичних застосувань зазначена нерівність виконується. З урахуванням цього зауваження отримуємо [5]

$$\mathbf{M}_{k+1} = \mathbf{D}_k [\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{D}_k]^\# \quad (10)$$

де символом  $[\bullet]^\#$  позначена псевдо обернена матриця Мура-Пенроуза.

*Аналіз властивостей модифікованого фільтра Калмана.* Повертаючись до перетвореної моделі стану (8), неважко побачити, що тут вектори стану  $\mathbf{s}_k$ , входу  $\mathbf{u}_k$  і виходу  $\mathbf{y}_k$  залишилися не змінними. Таким чином, початкова модель (1) і модифікована (8) є, по суті, еквівалентними, оскільки описують одну і ту ж систему, а складову  $\mathbf{M}_{k+1} \mathbf{y}_{k+1}$  можна інтерпретувати як новий відомий вхід. У цьому випадку немає формальних перешкод для застосування стандартної процедури оцінювання за методом Калмана, оскільки складова збурень у явній формі відсутня. З метою подальшого спрощення задачі припустимо, що кореляція між векторами  $\mathbf{n}_k$  і  $\xi_k$  відсутня. Тоді застосування класичного фільтра Калмана до перетвореної моделі (8) сформує в рекурентній формі наступні оцінки станів  $\hat{\mathbf{s}}_k$  і їх коваріаційні матриці  $\mathbf{P}_k$  для всіх  $k=0,1,2,3,\dots$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k+1|k} &= \mathbf{W}1_k \mathbf{P}_k \mathbf{W}1_k^T + \mathbf{Q}1_k; \\ \mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{P}_{k+1}^{-1}; \\ \mathbf{P}r_{k+1} &\triangleq E\{\mathbf{r}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1}^T\} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_k \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1}; \\ \mathbf{P}_{k+1|k+1} &= [\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}] \mathbf{P}_{k+1|k}; \\ \mathbf{r}_{k+1} &= \mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{s}}_{k+1|k}; \\ \hat{\mathbf{s}}_{k+1|k} &= \mathbf{W}1_k \hat{\mathbf{s}}_k + \mathbf{G}1_k \mathbf{u}_k + \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{y}_{k+1}; \\ \hat{\mathbf{s}}_{k+1|k+1} &= \hat{\mathbf{s}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1} \\ \hat{\mathbf{s}}_{0|0} &= \bar{\mathbf{s}}_0; \quad \mathbf{P}_{0|0} = \mathbf{P}_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Для того, щоб модифікований фільтр Калмана був гарантовано стійким, необхідно сформулювати ще два обмеження, додатково до тих, які вже наводилися в другому розділі. Суть їх зводиться до рівномірної повної спостережності пари  $[\mathbf{W}1_k, \mathbf{H}_k]$  і рівномірної повної керованості пари  $\{\mathbf{W}1_k [\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k], \mathbf{Q}_k^{-1}\}$ , що визначаються за допомогою матриці Грама. Вони дещо відрізняються від тих, які прийняті в теорії калманівської фільтрації, оскільки ця теорія безпосередньо не може бути застосована до розглянутої специфічної задачі. Дискусуючи по відношенню до властивостей синтезованого фільтра, слід зазначити наступне:

1. *Обмеженість.* Якщо введені припущення мають місце, то рекурентно обчислювані матриці  $\mathbf{P}_{k+1|k+1}$  і  $\mathbf{P}_{k+1|k}$ , а значить і  $\mathbf{P}r_{k+1}$ ,  $\mathbf{K}_k$ , є обмеженими. Іншими словами, зазначена властивість гарантує обмеженість всіх рекурентних обчислень, виключаючи оцінки вектору стану. Через наявність білого гаусового шуму помилки оцінювання стану в принципі не можуть бути обмеженими, проте обмеженням є другий момент – коваріаційна матриця помилок фільтрації. Зазначена властивість важлива для додатків, в яких всі обчислення повинні виконуватися в режимі реального часу.

2. *Стійкість.* При зроблених припущеннях, динамічні помилки оцінок стану (11) будуть тільки експоненціально стійкими, оскільки в даному випадку порушується одна з основних умов теорії фільтра Калмана – оберненість перехідної матриці станів  $\mathbf{W}1_k$ . Насправді ця матриця відповідно до виразу (7) є завжди сингулярною. Завдання забезпечення стійкості розглянутого фільтра, що вирішується в рамках теорії фільтра Калмана без вимоги оберненості перехідної матриці станів виходить за межі даної роботи. Однак, якщо ввести позначення для помилки оцінювання вектора станів  $\tilde{\mathbf{s}}_k \triangleq \mathbf{s}_k - \hat{\mathbf{s}}_k$ , то динаміку помилок оцінювання можна представити рівнянням

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}}_{k+1|k+1} &\triangleq [\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}] \mathbf{W}1_k \tilde{\mathbf{s}}_k + \\ &+ [\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}] \mathbf{w}_k - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{n}_{k+1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Згідно з [14], збіжність помилок оцінювання визначається тільки детермінованою частиною рівняння (12), яка характеризується виразом  $[\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}] \mathbf{W}1_k$ . Оскільки обчислення  $\mathbf{K}_{k+1}$  детерміновані, то стійкість динаміки помилок фільтрації забезпечується тільки припущеннями зробленими щодо  $\mathbf{W}1_k, \mathbf{H}_{k+1}, \mathbf{Q}1_k$ . Отже, на другу властивість корельованості процесів не впливає.

3. *Оптимальність.* Тут слід зауважити, що ігнорування кореляції між процесами  $\mathbf{n}_k$  і  $\xi_k$  призводить до втрати оптимальності модифікованого фільтра. Однак, як показало подальше моделювання, ці втрати відносно невеликі. Зазвичай на практиці, заради спрощення процедури оцінювання, цією корельованістю часто нехтують. У розглянутому випадку не зовсім очевидно, як слід враховувати кореляцію, обумовлену введенням перетворенням рівняння виходу системи, і це може бути предметом подальших досліджень.

*Результати моделювання.* Як тестовий приклад розглянемо дискретну динамічну систему, яка допускає опис співвідношеннями (1)–(2) при наступних значеннях системних матриць:

$$\mathbf{W}_k = \begin{bmatrix} 0.2995 & 0.0517 & 0.0314 \\ -0.0786 & -0.0286 & -0.0057 \\ 0.0141 & -0.0195 & -0.0186 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} 0.7005 \\ 0.0786; \\ -0.01441 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_k = [1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0]; \quad \mathbf{D}_k = [2.9798; -0.7005; -0.0786];$$

Практичним аналогом описаної моделі може виступати система прецизійного терморегулювання на основі просторово розподілених температурних сенсорів. Коваріаційні матриці шумових процесів  $\mathbf{n}_k, \xi_k$ , приймали значення  $\mathbf{Q} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot \mathbf{I}_3$ ;  $\mathbf{R} = 7 \cdot 10^{-3} \cdot \mathbf{I}_2$  відповідно, а середні значення передбачалися нульовими. Процес появи несправностей моделювався виразом:

$$\mathbf{d}_k = \begin{cases} k \leq 100, & \mathbf{d}_k = 0; \\ 100 \leq k \leq 300, & \mathbf{d}_k = -0.2; \\ 300 \leq k \leq 500, & \mathbf{d}_k = 0.001 \cdot (k - 300); \\ k \geq 500, & \mathbf{d}_k = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Інтерпретації (12) на інтервалі  $100 \leq k \leq 300$  відповідає раптова несправність у контрольному сенсорі, а на інтервалі  $300 \leq k \leq 500$  – поступова сенсорна деградація. В якості початкових умов приймалися величини:  $\mathbf{s}_0 = [0; 0; -1]^T$ ;  $\mathbf{u}_k = 1$ ;  $\hat{\mathbf{s}}_0 = [0; 0; 0]^T$ ;  $\mathbf{P}_0 = \mathbf{I}_3$ . Процес відтворення запропонованої моделі зображено на рис. 1.

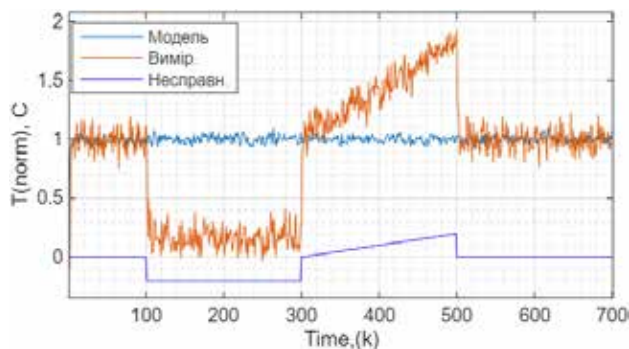
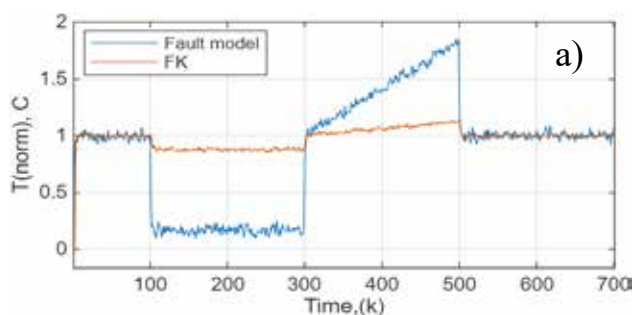


Рис. 1. Процес виникнення несправностей в сенсорній системі спостереження



Результати оцінювання складової вектору стану  $\hat{\mathbf{s}}_k$  стандартним фільтром Калмана представлені на рис. 2 а. Сигнальна нев'язка  $\mathbf{r}_k$  утворена різницею між виходом фільтра та динамікою збуреної моделі на рис. 2 б.

Як вже було зауважено, при коректній роботі фільтра Калмана різницевий процес, який називається оновлювальним, являє собою не корельований гаусівський випадковий процес з нульовим середнім значенням і коваріаційною матрицею, рекурентно обчислюваною за формулою:

$$\mathbf{P} \mathbf{r}_{k+1} \triangleq E \{ \mathbf{r}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1}^T \} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_k \left( \frac{k}{k} \right) \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1}.$$

На рис. 3 наведені аналогічні результати для модифікованого фільтра Калмана.

Зіставлення графіків  $\mathbf{r}_k$  на рис. 2 та рис. 3 підтверджує коректну роботу тільки модифікованого фільтра Калмана, оцінки якого адекватно реагують на вплив відтворених несправностей. Отже, задача декомпозиції процесу оцінювання від впливів з невизначеною структурою вирішена задовільно.

**Висновки.** Проблема отримання оцінок станів лінійних динамічних систем, вільних від впливу структурно невизначених збурень є актуальною для багатьох прикладних досліджень, у тому числі й у галузі функціональної діагностики. У представленій роботі ця задача вирішена шляхом введення відповідного взаємо-однозначного перетворення рівняння виходу розглянутої системи, що дозволяє здійснити процес поглинання збурень ще на етапі екстраполяції з подальшим застосуванням модифікованого фільтра Калмана. На відміну від інших відомих методів проектування, запропонований метод характеризується відносно простим алгоритмом та реалізацією, а перевірка умов існування рішення не потребує занадто складних процедур, що робить його практично зручним для застосування.

Наведено аргументацію, спрямовану на підтвердження властивостей отриманого рішення,

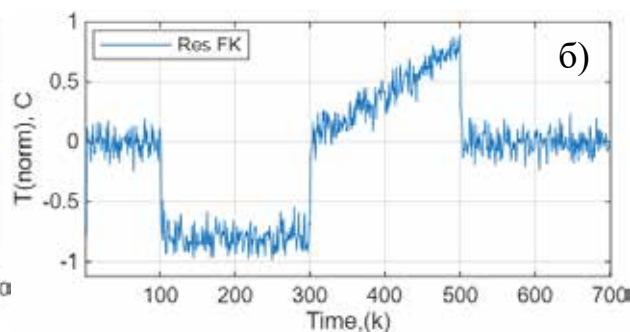


Рис. 2. Реакція стандартного фільтра Калмана на несправність каналу спостереження

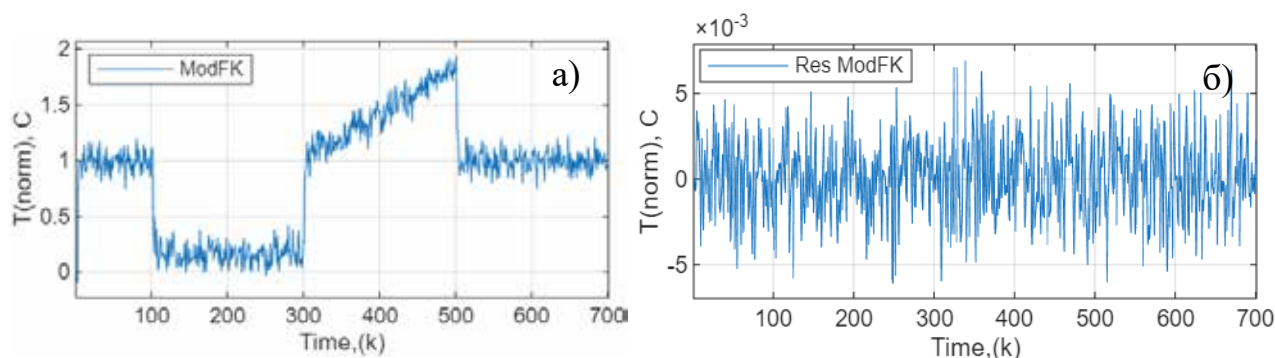


Рис. 3. Вихід модифікованого фільтра (а) та його різницевий сигнал (б)

серед яких стійкість, обмеженість та оптимальність. Зазначені характеристики розглядаються як фундаментальні критерії, що визначають коректність алгоритму та забезпечують його практичне застосування у задачах оцінювання й діагностики. Оскільки розглянуті питання ще не отримали достатнього висвітлення у науковій та періодичній літературі, є підстави стверджувати, що представлені результати містять елемент наукової новизни та розширюють тематику досліджень, пов'язаних

з оцінюванням станів динамічних систем, індиферентних до збурень довільної структури.

Із застосуванням принципів теорії прийняття рішень запропонований модифікований фільтр може бути використаний як діагностичний засіб, здатний не лише оцінювати динамічний стан об'єкта спостереження, але й виконувати функцію виявлення несправностей у сенсорній підсистемі, що підвищує надійність та інформативність процесу оцінювання.

#### Список літератури:

1. Saif M., Guan Y. Robust fault detection in systems with uncertainties,» Proceedings. *5th IEEE International Symposium on Intelligent Control*. 1990. Vol.1. Pp. 570–576. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIC.1990.128514>.
2. Volovyk A., Pyrih Y., Urikova O., Masiuk A., Shubyn B., Maksymyuk T. Dynamic System State Estimation with a Resilience to Observation Data Anomalies. *Contemp. Math.* 2024. Vol 5 Iss. 1 Pp 1–18. DOI: <https://doi.org/10.37256/cm.512024>
3. Zhao Z., Liu P. X., Gao J. A New Fault Detection Method for Systems With Uncertainty Under Denial-of-Service Attack. *IET Control Theory & Applications* 2025. No. 1: e70093. Pp 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1049/cth2.70093>
4. Chen J., Zhang H. Robust detection of faulty actuators via unknown input observers. *International Journal of Systems Science*. 1991. Vol 22(10). Pp. 1829–1839. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207729108910753>
5. Huang S., Zhang D., Guo L., Wu L. Robust fault tolerant control for interconnected systems with dynamic uncertainties and actuator faults. Chinese Control And Decision Conference (CCDC). 2018. Pp. 2228–2233. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407497>.
6. Gao N., Darouach M., Voos H., Alma M. New unified  $H_{\infty}$  dynamic observer design for linear systems with unknown inputs. *Automatica*. 2016. Vol. 665. Pp. 43–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.10.052>.
7. Lan J., Patton R. A decoupling approach to integrated fault-tolerant control for linear systems with unmatched non-differentiable faults. *Automatica*. 2018. Vol. 89. Pp. 290–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.12.011>
8. Gillijns S. De M. Unbiased minimum-variance input and state estimation for linear discrete-time systems. *Automatica*. 2007. Vol. 43. Pp. 934–937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2006.11.016>
9. Lan J., Patton R. A decoupling approach to integrated fault-tolerant control for linear systems with unmatched non-differentiable faults. *Automatica*. 2018. Vol. 89. Pp. 290–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.12.011>
10. Воловик А. Оптимальні оцінки вектора стану для дискретних стохастичних систем з невизначеними збуреннями та шумом. *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. Львів, 2023. Вип. 3, № 2, С. 116–125. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2023.09.067>
11. Bezzaoucha S., Voos H., Darouach M., Dentler J. On the unknown input functional observers design: A polytopic Takagi-Sugeno approach. *4th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2016. Pp. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.1109/MED.2016.7535889>.

13. Wang L, Guan R. State Feedback Controller and Observer Design. *State Feedback Control and Kalman Filtering with MATLAB/Simulink Tutorials*. 2023. Pp.1–66. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119694625.ch1>.
14. Southall B., Buxton B., Marchant J. (1998). Controllability and Observability: Tools for Kalman Filter Design. *British Machine Vision Conference*. 1998. DOI: <https://doi.org/10.5244/C.12.17>.
15. Kitanidis P. Unbiased minimum-variance linear state estimation. *Automatica*. 1987. Vol. 23. Pp. 775–778.
16. Hsieh C. Unbiased Minimum-Variance Input and State Estimation for Systems with Unknown Inputs: An Online Solution. *International Automatic Control Conference (CACCS)*. 2020. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CACCS50047.2020.9289795>.
17. Zhang J. Unbiased minimum-variance disturbance and state estimation for linear systems with both state and output disturbances. *International Journal of Systems Science*. 2025. Vol. 56(1. Pp. 98–107. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207721.2024.2388806>

#### **Volovyk A.Yu., Nikolenko M.S. ESTIMATING DYNAMIC SYSTEM STATE IN THE PRESENCE OF OBSERVATION CHANNEL FAULTS**

*Methods for estimating the dynamic systems states have found wide application in various fields of applied research. The most well-known of these is the Kalman filter method. When using this method, the results of observations by the sensory subsystem serve as the information source for correcting the assessment and the innovation process serves as a correct operation indicator of the assessment algorithm. For nominal operation, the difference signal is a Gaussian uncorrelated random process with zero mean and a priori computational covariance matrix. In the event of sudden malfunctions or unforeseen structurally uncertain disturbances in the sensor subsystem, these conditions are violated. The aim of this work is to develop a method that allows the normal operation of the Kalman filter to be restored under the stated conditions. The set goal is achieved by applying a special one-to-one transformation of the system output equation under study, as a result of which the disturbance component is absorbed in the extrapolation equation of the dynamic system state vector. The assumptions used to solve the problem coincide with those usually accepted in classical linear filtering theory, while the disturbances are completely arbitrary, cannot be described probabilistically and have no upper limit. To ensure the correctness of the solution to the problem, assumptions are made regarding the boundedness of system matrices which allow avoiding indeterminate solutions. At the next stage, a modified Kalman filter is applied to the corrected system in a certain way. Considerable attention is paid to the analysis of the properties of the resulting filter related to the estimation errors stability. The functional performance of the proposed method was confirmed by statistical modeling on a test example of a third-order linear dynamic system. Unlike other known design methods, the proposed method is characterized by a relatively simple algorithm and implementation and verification of the conditions for the existence of a solution does not require overly complex procedures which makes it practical and convenient to use. Unlike other well-known design methods, the proposed method is characterized by a relatively simple algorithm and implementation but the conditions for the existence of the solution do not require overly complex procedures, all of which makes it practical and convenient to use.*

**Keywords:** *optimal state estimation in the presence of faults, linear dynamic systems, Kalman filter, structurally indeterminate disturbances.*

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Воронець О.М.**<https://orcid.org/0009-0005-5714-2370>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**Пустовойтов П.Є.**<https://orcid.org/0000-0003-3884-0200>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОЇ ЕНЕРГІЇ ВУЗЛІВ З УРАХУВАННЯМ ТОПОЛОГІЇ ТА НАВАНТАЖЕННЯ В БЕЗДРОТОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

У статті розглянуто проблему оцінювання часу життя вузлів бездротових сенсорних мереж (БСМ), для яких обмеженість енергетичного ресурсу є визначальним чинником тривалості та надійності функціонування. Показано, що традиційні моделі, які базуються на припущеннях про сталий трафік або рівномірне навантаження, не здатні точно описати процес деградації мережі в умовах просторово-часової неоднорідності трафіку та змінних характеристик каналів зв'язку. У роботі сформульовано аналітичну модель енергоспоживання, що враховує миттєві витрати потужності на передавання та приймання даних, залежність втрат енергії від відстані до приймача та інтенсивності потоків інформації.

Запропонована модель дозволяє визначити залишкову енергію вузла як функцію часу, встановити порогові умови його деградації та отримати аналітичний вираз для оцінки тривалості роботи в стаціонарних і динамічно змінних умовах. Особливу увагу приділено критеріям функціонального завершення роботи мережі, зокрема моменту відмови найслабшого вузла та часу, коли частка працездатних елементів зменшується нижче критичного порогу.

Для валідації моделі проведено чисельне моделювання на прикладі мережі з 25 вузлів за різних інтенсивностей трафіку, відстаней передавання та параметрів енергоспоживання. Результати демонструють істотний вплив топологічних та трафікових характеристик на тривалість роботи вузлів і наочно підтверджують адекватність запропонованої аналітичної залежності. Встановлено, що зростання інтенсивності передавання або збільшення середньої відстані до приймача призводить до різкого скорочення часу життя елементів мережі, що узгоджується з теоретичними передбаченнями моделі.

Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальших досліджень, пов'язаних з оптимізацією маршрутизації, балансування навантаження та планування розгортання БСМ, забезпечуючи можливість точного прогнозування деградації та підвищення енергоефективності мережевих систем.

**Ключові слова:** сенсорна мережа, математична модель, енергія вузлів, якість обслуговування, енергоефективність, імітаційне моделювання, бездротові сенсорні мережі, передача даних, топологія мережі, оптимізація енергоресурсів.

**Постановка проблеми.** Бездротові сенсорні мережі (БСМ) є ключовим компонентом сучасних інформаційно-комунікаційних систем, що забезпечують збір, передавання та обробку даних у широкому спектрі застосувань – від екологічного моніторингу та систем безпеки

до медичних, промислових і військових задач. Незважаючи на стрімкий розвиток апаратної бази та протоколів зв'язку, проблема обмеженого енергетичного ресурсу сенсорних вузлів залишається критичною для забезпечення довготривалої та надійної роботи мережі. У зв'язку



з цим особливого значення набуває задача точного оцінювання часу життя окремих вузлів та всієї мережі в цілому.

У більшості практичних випадків сенсорні вузли функціонують у складних умовах, де інтенсивність трафіку, топологія мережі та характеристики каналів зв'язку можуть змінюватися в часі. Це створює необхідність у розробці моделей, здатних враховувати неоднорідність навантаження та просторово-часову динаміку процесів енергоспоживання. Традиційні підходи, що базуються на спрощених припущеннях про постійне енергоспоживання або рівномірний розподіл навантаження, не забезпечують достатньої точності для прогнозування деградації мережі та прийняття ефективних рішень щодо її оптимізації.

Запропонована у даній роботі модель орієнтована на подолання зазначених обмежень і дозволяє аналітично описати процес вичерпання енергетичних ресурсів вузлів з урахуванням таких важливих факторів, як інтенсивність передавання та приймання даних, відстань до приймача, втрати у середовищі та критичні порогові значення енергії. Розробка та валідація цієї моделі створює теоретичну базу для подальших досліджень з оптимізації маршрутизації, балансування навантаження та планування розгортання БСМ з урахуванням обмежених енергетичних можливостей.

Таким чином, актуальність дослідження визначається як науковою потребою у вдосконаленні моделей оцінки життєвого циклу сенсорних мереж, так і практичною важливістю для розробки енергоефективних систем з прогнозованою тривалістю функціонування в реальних умовах експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оцінка часу життя вузлів є ключовим аспектом при проектуванні бездротових сенсорних мереж, особливо в енергетично обмежених умовах. Від ефективності моделей, що описують процес споживання енергії, залежить здатність мережі тривалий час забезпечувати необхідну якість обслуговування та зберігати функціональне покриття. У зв'язку з цим значна кількість наукових праць присвячена пошуку адекватних математичних і алгоритмічних рішень, які дозволяють точно оцінити або прогнозувати залишкову енергію та час роботи окремих вузлів чи всієї системи. Проведений огляд дозволяє виявити існуючі підходи, їх переваги та обмеження, а також визначити напрямки подальшого удосконалення моделей з урахуванням просторової структури та змінного навантаження в мережі.

Серед основних підходів – аналітичні моделі енергоспоживання вузла, які враховують витрати на передавання й приймання сигналу з відстанню та зниженою продуктивністю інтерфейсів [1-2]. Інший важливий напрям – оптимізаційні алгоритми (наприклад, лінійне програмування, евристичні методи), спрямовані на максимізацію мінімального або середнього часу життя мережі з урахуванням топології й балансування навантаження [3-5]. Застосування моделей з учасниками рухомих вузлів або мобільних приймачів дозволяє підвищити ефективність систем, хоча і значно ускладнює їхню реалізацію [6].

Окремі роботи концентруються на використанні кластеризації, побудові енергоефективних маршрутів і комбінованих підходах, що поєднують маршрутизацію та планування чергування вузлів у режимах сну й активності [7-9]. Ці стратегії дозволяють знизити загальне навантаження на мережу, зменшуючи енергоспоживання без шкоди для покриття.

Сучасні акцентовані дослідження використовують методи машинного навчання для швидкої оцінки часу життя мережі, зокрема глибокі нейронні мережі, що демонструють високу точність у реальному часі [10]. Такі моделі можуть бути використані як надбудова над класичними аналітичними підходами, підвищуючи гнучкість і адаптивність до зміни параметрів навколишнього середовища.

Особлива увага приділяється також гібридним системам з енергетичними джерелами на вузлах – наприклад, збирання енергії від радіочастотного випромінювання або сонячного світла. Відповідні дослідження демонструють можливість суттєвого подовження тривалості життя мережі [11-13]. Проте реалізація таких систем потребує більш складного планування й урахування випадкових зовнішніх чинників (наприклад, кліматичних умов).

Таким чином, ключовими перевагами сучасних моделей є врахування фізичних характеристик середовища, здатність адаптації до змін навантаження та підтримка складних топологічних сценаріїв. Недоліками залишаються складність практичної реалізації, висока обчислювальна складність та відсутність універсальності при зміні зовнішніх умов або класу застосувань.

Проведений аналіз показує, що немає універсального підходу до задачі оцінки часу життя БСМ. Аналітичні моделі забезпечують простоту й швидкість, тоді як оптимізаційні та ML-методи забезпечують гнучкість і точність. Раціональ-



ним напрямом подальших досліджень є побудова гібридних рішень, які поєднують переваги аналітичних формул із прогнозною потужністю нейронних або статистичних моделей.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є побудова аналітичної моделі оцінки часу життя вузлів бездротової сенсорної мережі з урахуванням змінного навантаження, топологічного розташування та втрат енергії, що залежать від відстані передавання. На відміну від традиційних підходів, запропонована модель покликана забезпечити більш точне прогнозування моменту деградації вузлів, виходячи з реальних характеристик трафіку й енергоспоживання.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі основні задачі:

- необхідно сформулювати математичний опис миттєвого та інтегрованого енергоспоживання сенсорного вузла на основі параметрів трафіку та просторових характеристик;
- слід визначити функцію залишкової енергії у часі та встановити критерії деградації вузлів залежно від порогових значень енергетичного ресурсу;
- потрібно побудувати аналітичний вираз для оцінки часу життя вузла в умовах як стаціонарного, так і змінного навантаження;
- здійснити чисельне моделювання для валідації запропонованої моделі та проаналізувати її поведінку при різних вхідних параметрах.

Реалізація цих задач дозволить не лише підвищити точність оцінки життєвого циклу сенсорної мережі, а й створити основу для подальшої оптимізації енергоспоживання шляхом адаптивної маршрутизації, динамічного балансування трафіку та вибору топологій з урахуванням обмежень енергетичного ресурсу.

**Виклад основного матеріалу.** Математична модель оцінки життя вузлів сенсорної мережі. З метою оцінювання часу життя бездротової сенсорної мережі необхідно враховувати динаміку енергоспоживання окремих вузлів, що є функцією навантаження, топологічного розміщення, інтенсивності трафіку та характеристик середовища. Запропонована нижче модель дає змогу аналітично описати процес витрати енергії вузлами мережі та визначити критичні моменти їх деградації.

Розглянуто множину сенсорних вузлів  $N = \{1, 2, \dots, N\}$ , кожен з яких характеризується початковим запасом енергії  $E_i^{(0)}$  [Дж]. Даний параметр визначає максимально можливий енергетичний ресурс вузла і до моменту його повного

виснаження. На відміну від спрощених моделей, де припускається постійне енергоспоживання або однорідне навантаження, у запропонованій моделі враховується змінність трафіку у часі, а також просторові особливості передавання даних, зокрема залежність енергетичних втрат від відстані до приймача.

Припустимо, що миттєве енергоспоживання вузла в момент часу  $t$  визначається сумарною потужністю, витраченою на передавання та приймання пакетів:

$$P_i(t) = P_i^{tx}(t) + P_i^{rx}(t), \quad (1)$$

де  $P_i^{tx}(t)$  – потужність, яка витрачається на активне передавання даних;

$P_i^{rx}(t)$  – потужність, що витрачається на приймання інформації, включаючи власні й транзитні пакети.

Передавання в сенсорних мережах характеризується експоненційною залежністю втрат енергії від відстані до приймача, що відображено в моделі передавальної потужності:

$$P_i^{tx}(t) = \alpha \cdot \lambda_i(t) \cdot d_i(t)^\gamma, \quad (2)$$

де  $\lambda_i(t)$  – інтенсивність потоку даних, які передає вузол  $i$ , [біт/с];

$d_i(t)$  – ефективна (усереднена) відстань до приймача, [м];

$\gamma$  – показник втрат у середовищі (характеризує затухання сигналу, звичайно  $2 \leq \gamma \leq 4$ );

$\alpha$  – коефіцієнт пропорційності, що враховує апаратну ефективність передавача.

У свою чергу, потужність приймання залежить від кількості оброблюваних вхідних пакетів і записується як:

$$P_i^{rx}(t) = \beta \cdot \mu_i(t), \quad (3)$$

де  $\mu_i(t)$  – інтенсивність транзитного чи локального приймання вузлом  $i$ , [біт/с];

$\beta$  – питомий коефіцієнт енергоспоживання для приймального тракту.

Таким чином, загальна миттєва потужність, яка споживається вузлом у момент часу  $t$ , має вигляд:

$$P_i(t) = \alpha \cdot \lambda_i(t) \cdot d_i(t)^\gamma + \beta \cdot \mu_i(t). \quad (4)$$

Інтегруючи дану потужність за часом, отримаємо загальну витрачену енергію вузла  $i$  в інтервалі часу  $[0, T]$ :

$$E_i(t) = \int_0^T P_i(t) dt = \int_0^T (\alpha \cdot \lambda_i(t) \cdot d_i(t)^\gamma + \beta \cdot \mu_i(t)) dt. \quad (5)$$

Відповідно, функція залишкової енергії вузла в момент часу  $t$  задається як:

$$E_i^{res}(t) = E_i^{(0)} - \int_0^t (\alpha \cdot \lambda_i(\tau) \cdot d_i(\tau)^\gamma + \beta \cdot \mu_i(\tau)) d\tau. \quad (6)$$

Фізично це означає, що вузол поступово втрачає енергію внаслідок передавання та обробки інформації. Момент, коли залишкова енергія опускається нижче за визначене порогове значення  $\varepsilon \cdot E_i^{(0)}$ , вважається точкою деградації вузла, тобто його функціональної неієздатності:

$$E_i^{res}(t) \leq \varepsilon \cdot E_i^{(0)}, \quad 0 < \varepsilon < 1. \quad (7)$$

На основі цього визначимо час життя вузла – це найменший момент часу, коли досягнуто або перевищено поріг знеструмлення:

$$T_i^{life} = \inf \{t \geq 0 \mid E_i^{res}(t) \leq \varepsilon \cdot E_i^{(0)}\}. \quad (8)$$

У випадку постійних параметрів трафіку та розташування ( $\lambda_i, \mu_i, d_i$ , не залежать від часу), отримаємо аналітичну формулу оцінки часу життя:

$$T_i^{life} = \frac{E_i^{(0)} - \varepsilon \cdot E_i^{(0)}}{\alpha \cdot \lambda_i \cdot d_i^\gamma + \beta \cdot \mu_i} = \frac{(1 - \varepsilon) E_i^{(0)}}{\alpha \cdot \lambda_i \cdot d_i^\gamma + \beta \cdot \mu_i}. \quad (9)$$

Цей вираз дає пряму оцінку тривалості функціонування вузла залежно від початкової енергії, параметрів передавання та трафіку.

Однак у реальних системах значення  $\lambda_i, \mu_i, d_i$  змінюються з часом. Тому доцільно використовувати усереднені значення для наближеної оцінки:

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda_i(t) dt, \quad (10)$$

$$\bar{\mu}_i = \frac{1}{T} \int_0^T \mu_i(t) dt, \quad (11)$$

$$\bar{d}_i = \frac{1}{T} \int_0^T d_i(t) dt. \quad (12)$$

Після цього модель часу життя вузла може бути апроксимована у вигляді:

$$T_i^{life} \approx \frac{(1 - \varepsilon) E_i^{(0)}}{\alpha \cdot \bar{\lambda}_i \cdot \bar{d}_i^\gamma + \beta \cdot \bar{\mu}_i}. \quad (13)$$

Такий підхід дозволяє адаптувати модель до нестабільних режимів роботи мережі, у яких трафік, топологія або стан каналів зв'язку змінюються у часі.

*Критерій оцінки часу життя сенсорної мережі.* Для комплексної оцінки часу життя сенсорної мережі в цілому, необхідно враховувати не лише індивідуальні характеристики окремих вузлів, але й поведінку всієї системи в контексті функціонального покриття. У практиці проектування та аналізу бездротових сенсорних мереж

використовують кілька формальних критеріїв, які дають змогу визначити момент, коли мережу можна вважати такою, що вичерпала свій життєвий цикл.

Перший критерій – це мінімальний час життя серед усіх вузлів, який відображає момент відмови найслабшого вузла:

$$T_{min}^{net} = \min_{i \in N} T_i^{life}. \quad (14)$$

Цей підхід відображає найбільш песимістичну оцінку, в якій навіть одинична деградація одного вузла вважається завершенням функціонування всієї системи. Такий критерій має сенс у критичних застосуваннях (наприклад, медичних або військових), де втрата одного вузла може призвести до порушення цілісності даних або втрати зони покриття.

Другий, більш гнучкий критерій – це втрата покриття мережі, що базується на зменшенні кількості працездатних вузлів до певного критичного рівня. Зазвичай цей рівень визначається параметром  $\theta \in (0, 1)$ , який характеризує допустиму частку «живих» вузлів відносно початкової кількості:

$$T_{min}^{net} = \inf \left\{ t \geq 0 \mid \frac{|N_{alive}(t)|}{N} \leq \theta \right\}, \quad (15)$$

де  $N_{alive}(t) = \{i \in N \mid E_i^{res}(t) > \varepsilon \cdot E_i^{(0)}\}$ .

Цей критерій має чіткий фізичний зміст: він відображає той момент часу, коли кількість вузлів, що залишились працездатними (тобто мають енергію вище порогового значення  $\varepsilon \cdot E_i^{(0)}$ , опускається нижче певного порогового рівня, при якому мережа вже не здатна забезпечити необхідну щільність спостереження або збереження топології.

Таким чином, (14) дає змогу оцінити гарантовано мінімальний строк функціонування, тоді як (15) – більш адаптивну характеристику реального зниження ефективності мережі, що відповідає сценаріям поступової деградації.

*Експериментальна перевірка критеріїв.* З метою перевірки адекватності запропонованої моделі оцінки часу життя вузлів було проведено моделювання сенсорної мережі за різних конфігурацій топології, інтенсивності трафіку та параметрів енергоспоживання.

Для моделювання обрана мережа з 25 вузлів, розташованих на площині  $100 \times 100$  м у вигляді квадратної решітки. Початковий енергетичний ресурс усіх вузлів становить  $E_i^{(0)} = 2$  Дж. Інтенсивність генерації трафіку змінюється в діапазоні  $\lambda_i \in [100, 500]$  біт/с. Значення  $d_i$  визначаються

евклідовими відстанями до найближчого вузла-приймача.

У процесі моделювання були встановлені такі значення основних параметрів моделі: коефіцієнт пропорційності для передавання даних  $\alpha = 10^{-9}$  Дж/(біт·γ) Дж, що відображає ефективність передавального тракту; питомі енергетичні витрати на приймання  $\beta = 5 \cdot 10^{-8}$  Дж/біт; експонента затухання сигналу в середовищі  $\gamma$  взята рівною 2.5, що відповідає типовим умовам бездротового розповсюдження у відкритому просторі; а пороговий рівень деградації вузла  $\varepsilon$  визначено як 0.1, тобто вузол вважається непрацездатним після втрати 90% початкового енергетичного ресурсу. Ці значення відповідають типовим характеристикам сенсорного обладнання та забезпечують реалістичну оцінку часу життя вузлів.

Для демонстрації практичного застосування запропонованої моделі та перевірки її аналітичних передбачень було проведено серію чисельних експериментів за фіксованих умов трафіку та просторового розташування вузлів. У таблиці наведено результати розрахунку часу життя для окремих сенсорних вузлів за різних значень інтенсивності передавання даних, середньої відстані до приймача та навантаження на приймальний тракт. Значення часу життя  $T_i$  отримано відповідно до формули (13), яка враховує як передавальні, так і приймальні енергетичні витрати. Таблиця ілюструє вплив параметрів мережі на тривалість функціонування вузлів і дозволяє виявити найбільш уразливі компоненти системи.

Таблиця 1

**Час життя окремих вузлів  
при фіксованому трафіку**

| Вузол | $l$ | $d$ , м | $\mu$ , біт/с | $T_i$ , с |
|-------|-----|---------|---------------|-----------|
| 1     | 100 | 10      | 200           | 34918     |
| 5     | 200 | 20      | 300           | 12437     |
| 13    | 150 | 25      | 250           | 16029     |
| 17    | 400 | 15      | 400           | 6219      |
| 25    | 500 | 30      | 500           | 3980      |

На рисунку 1 проілюстровано зміну часу життя сенсорного вузла залежно від інтенсивності трафіку  $\lambda$  при фіксованих значеннях відстані до приймача та інтенсивності приймання. Як видно з кривої, із зростанням  $\lambda$  спостерігається стрімке зменшення часу життя вузла. Це цілком відповідає фізичній природі процесу: збільшення кількості передаваних бітів за одиницю часу підвищує миттєве енергоспоживання, що призводить до швидшого виснаження енергетичного ресурсу. Така залежність підтверджує достовірність формули (13) і демонструє, що навіть невелике зростання трафіку може суттєво вплинути на тривалість роботи мережі.

Графік на рисунку 2 відображає зміну залишкової енергії  $E(t)$  для трьох різних вузлів із різними параметрами навантаження. Криві показують поступове зниження енергетичного ресурсу відповідно до інтенсивності їхньої роботи. Пунктирна лінія позначає пороговий рівень  $\mu \cdot E(0)$ , нижче якого вузол вважається деградованим. Аналіз показує, що вузли з вищим трафіком або біль-

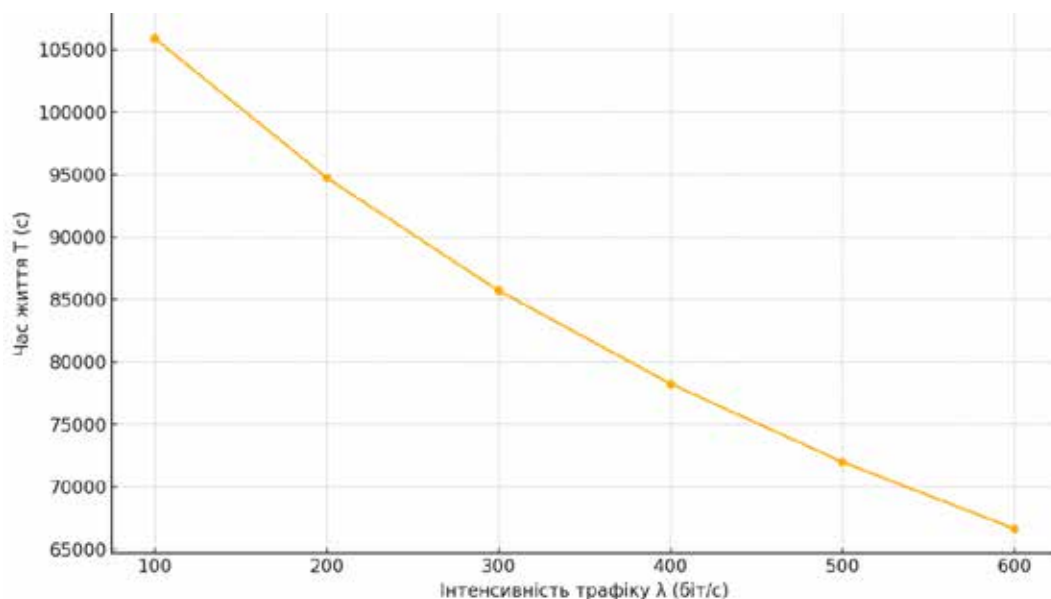
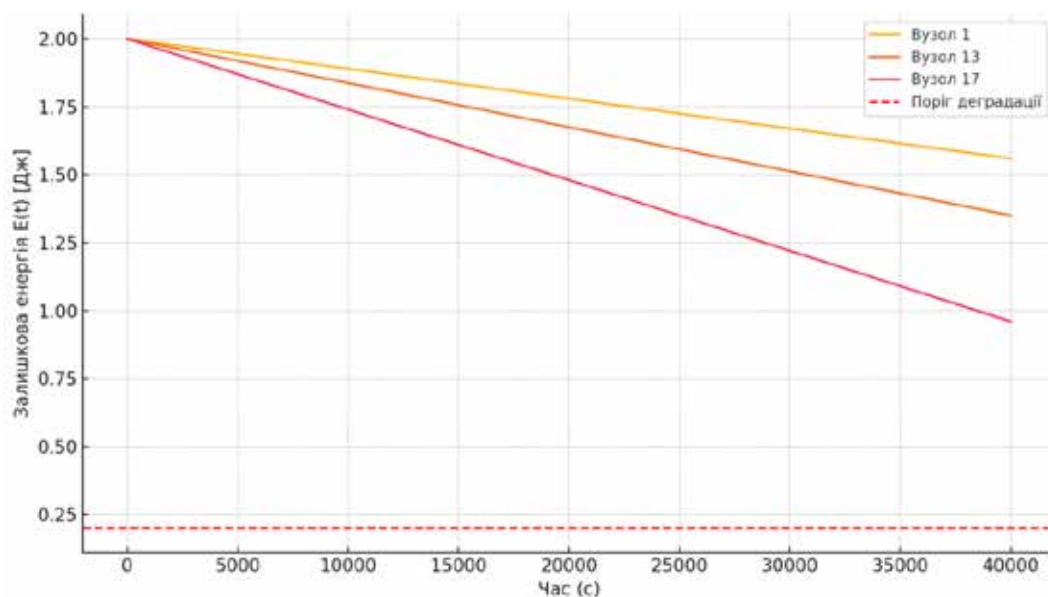
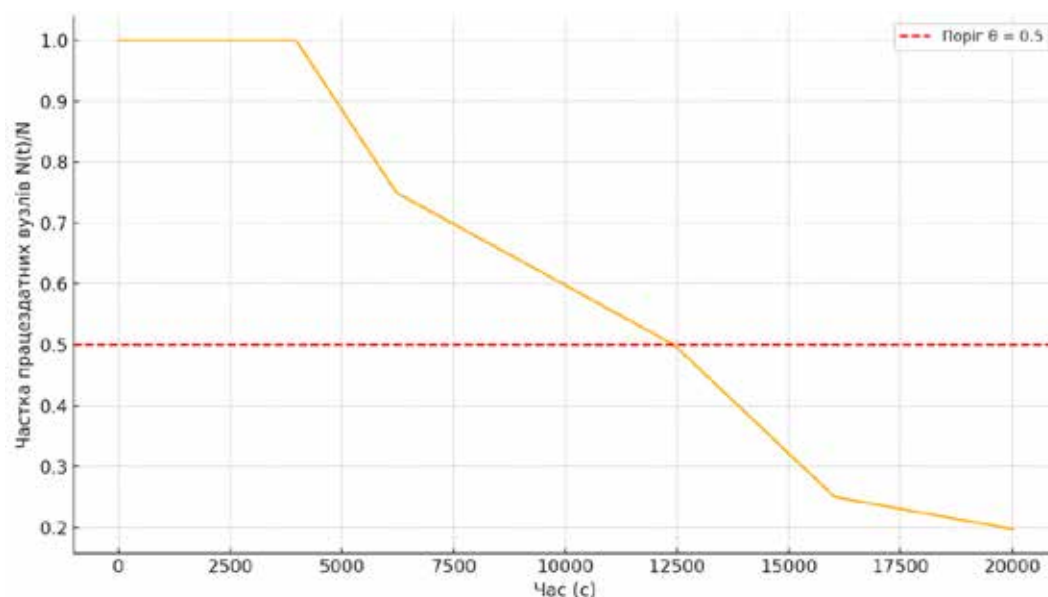


**Рис. 1. Залежність часу життя вузлів від інтенсивності трафіку при фіксованій відстані ( $\lambda$  змінюється від 100 до 600 біт/с,  $d = 20$  м)**

Рис. 2. Залишкова енергія вузлів у часі ( $E(t)$ ) для вузлів 1, 13, 17)Рис. 3. Кількість працездатних вузлів  $N(t)/N$  з плином часу (критичний поріг  $\theta=0.5$ )

шою відстанню до приймача досягають порогу набагато раніше. Цей графік наочно демонструє динаміку виснаження енергії у вузлах і дозволяє оцінити час, коли окремі компоненти мережі втраять працездатність.

Третій графік відображає зміну частки працездатних вузлів  $N(t)/N$  у процесі функціонування мережі. Крива показує поступове зменшення кількості вузлів, що зберігають залишкову енергію вище порогового рівня. Особливу увагу слід звернути на горизонтальну лінію, що позначає критичний рівень  $\theta=0.5$ . У момент перетину цього рівня

система втрачає здатність підтримувати необхідне покриття або щільність збирання даних.

Такий аналіз дозволяє виявити момент функціонального зниження якості обслуговування мережі, що є ключовим для проєктування надійних телеметричних систем.

**Висновки.** Результати моделювання демонструють пряму залежність між інтенсивністю трафіку, відстанню до приймача та часом життя сенсорних вузлів. Зокрема, при зростанні інтенсивності передавання даних та збільшенні середньої відстані до приймача, спостерігається суттєве

зменшення тривалості роботи вузлів. Це пояснюється фізичною природою процесу: передавання інформації на більші відстані потребує більших енергетичних витрат через експоненціальне зростання втрат сигналу в середовищі, а підвищення швидкості передачі збільшує загальну кількість витраченої енергії. Така поведінка повністю узгоджується з аналітичним виразом (13), що описує час життя вузла як функцію передавальних параметрів і дає змогу прогнозувати його деградацію залежно від мережевого навантаження.

Особливу увагу заслуговує найменший час життя серед усіх вузлів у мережі. Саме цей параметр визначає момент відмови першого (найслабшого) вузла, що критично важливо для застосувань з підвищеними вимогами до надійності, таких як моніторинг техногенно небезпечних об'єктів або військові системи. Відповідність цього показника

критерію (14) дає змогу швидко оцінити гарантований мінімальний термін працездатності мережі.

Ще одним важливим спостереженням є динаміка зменшення кількості працездатних вузлів у часі. Після досягнення критичного рівня, коли частка вузлів, що залишаються функціональними, падає нижче 50%, мережа втрачає здатність до забезпечення повного покриття або підтримки необхідної щільності збирання даних. Це явище описується критерієм (15) і відображає реалістичний сценарій поступової деградації системи, яка ще може працювати, але вже не забезпечує задану якість обслуговування.

Таким чином, отримані результати підтверджують теоретичні положення моделі та дозволяють на практиці оцінювати ефективність мережевої інфраструктури, прогнозувати її деградацію й оптимізувати параметри конфігурації з метою продовження загального часу функціонування мережі.

### Список літератури:

1. Heinzelman W. B., Chandrakasan A. P., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. 2000. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926982>
2. Пустовойтов П., Воронець О. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахування QoS та енергозбереження. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Інформатика і моделювання. 2025. Т. 1, № 1 (13). С. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>
3. Chang J. H., Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2004. Vol. 12, no. 4. P. 609–619. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNET.2004.833122>
4. Dietrich I., Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*. 2009. Vol. 5, no. 1. P. 1–39. DOI: <https://doi.org/10.1145/1464420.1464425>
5. Pustovoitov, P., Voronets, V., Voronets, O., Sokol, H., Okhrymenko, M. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, no. 4 (127). P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>
6. Воронець О. М., Пустовойтов П. Є. Метод формування зон покриття сенсорної мережі з нерівномірною щільністю вузлів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2025. № 2 (24). С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.02.05>
7. Sivakumar N. R., Pappa N. An optimized energy-efficient clustering and routing protocol for wireless sensor networks using a hybrid moth-flame optimization algorithm. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 21. Art. 8123. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218123>
8. Компанієць В.О., Пустовойтов П.Є. Метод математичного моделювання самоподібного трафіку у інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ*. 2025. Т. 4 (78). С. 187–189. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.187>
9. Сокол Г.В., Ковда Є.О. Метод виявлення несанкціонованих вузлів на MAC-рівні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 4. С. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/12>
10. Савченко М.В., Шиман М.В., метод аналізу завантаження вузлів кластеру mesh-мережі на основі математичної моделі мереж Джексона. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2025. Т. 1, № 79. С. 201–204. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.201-204>
11. Sudevalayam S. Advances in energy harvesting for sustainable wireless sensor networks: Challenges and opportunities. *Hardware*. 2025. Vol. 3, no. 1. P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/hardware3010001>
12. Gupta A. Enhanced hybrid energy harvesting strategies for sustainable wireless sensor network performance. *International Journal of Computer Applications*. 2025. Vol. 187, no. 3. P. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2025924826>
13. Sung G.-M., Chen S.-H., Choppa V., Yu C.-P. Hybrid radio-frequency-energy and solar-energy-harvesting-integrated circuit for IoT and low-power applications. *Electronics*. 2024. Vol. 14, no. 11. Art. 2192. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14112192>

**Voronets O.M., Pustovoitov P.Ye. MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING RESIDUAL ENERGY OF NODES TAKING INTO ACCOUNT TOPOLOGY AND LOAD IN A WIRELESS SENSOR NETWORK**

*The article considers the problem of estimating the lifetime of wireless sensor network (WSN) nodes, for which the limited energy resource is a determining factor in the duration and reliability of operation. It is shown that traditional models based on assumptions about constant traffic or uniform load are unable to accurately describe the process of network degradation in conditions of spatio-temporal heterogeneity of traffic and variable characteristics of communication channels. The paper formulates an analytical model of energy consumption that takes into account the instantaneous power consumption for data transmission and reception, the dependence of energy losses on the distance to the receiver and the intensity of information flows.*

*The proposed model allows determining the residual energy of a node as a function of time, establishing threshold conditions for its degradation, and obtaining an analytical expression for estimating the duration of operation in stationary and dynamically changing conditions. Particular attention is paid to the criteria for the functional termination of network operation, in particular, the moment of failure of the weakest node and the time when the proportion of serviceable elements decreases below the critical threshold.*

*To validate the model, numerical simulations were conducted on the example of a network of 25 nodes with different traffic intensities, transmission distances and energy consumption parameters. The results demonstrate a significant impact of topological and traffic characteristics on the duration of node operation and clearly confirm the adequacy of the proposed analytical dependence. It was found that an increase in transmission intensity or an increase in the average distance to the receiver leads to a sharp reduction in the lifetime of network elements, which is consistent with the theoretical predictions of the model.*

*The proposed approach can be used as a basis for further research related to routing optimization, load balancing and planning for BSM deployment, providing the ability to accurately predict degradation and increase energy efficiency of network systems.*

**Keywords:** *sensor network, mathematical model, node energy, quality of service, energy efficiency, simulation modeling, wireless sensor networks, data transmission, network topology, energy resource optimization.*

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Гайдар Ю.Б.**<https://orcid.org/0009-0003-8945-1464>

Національний університет «Львівська політехніка»

## МЕТОД ПРИСКОРЕНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ MESH-МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11BE З АДАПТИВНИМ ВИБОРОМ МАГІСТРАЛЬНОГО КАНАЛУ

У статті розглядається актуальна науково-практична задача підвищення ефективності розгортання та функціонування бездротових Mesh-мереж нового покоління стандарту Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be). Основна увага приділена вирішенню проблеми часових затримок, що виникають під час початкової ініціалізації магістральних каналів зв'язку (Backhaul) у діапазоні 5 ГГц. Встановлено, що обов'язкова процедура перевірки доступності каналу (DFS CAC), яка триває від 60 до 600 секунд, створює критичні зони простою мережі («мертві зони»), що негативно впливає на якість досвіду користувачів (QoE) та стабільність мультимедійних сервісів.

Було запропоновано та науково обґрунтовано метод прискореної організації Mesh-мережі, який базується на впровадженні алгоритму двоетапного адаптивного онбордингу вузлів. На відміну від існуючих рішень, що спираються на складну апаратну реалізацію технології Multi-Link Operation (MLO STR), розроблений метод використовує рівень абстракції протоколу IEEE 1905.1 для динамічного керування топологією за допомогою механізму Backhaul Steering. Суть методу полягає у пріоритетному використанні діапазону 6 ГГц (UNII-5) для миттєвого встановлення зв'язку на етапі запуску системи (Fast Start) з подальшим переведенням процедур підготовки енергоефективних каналів 5 ГГц у фоновий режим роботи. У роботі проведено математичне моделювання енергетичних параметрів лінків на основі логарифмічної моделі втрат у вільному просторі. Визначено критичне порогове значення рівня сигналу -67 дБм, при якому ініціюється процедура перемикавання на резервний діапазон для збереження високоефективної модуляції 64-QAM. Встановлено, що такий підхід забезпечує додатковий енергетичний виграш у 4 дБм в умовах затухання сигналу в перешкодах. Розрахунковим шляхом доведено, що впровадження запропонованого алгоритму дозволяє скоротити час повної ініціалізації від 2.22 до 13.1 разів в залежності від затримки під час DFS сканування, що підтверджує доцільність використання методу для пришвидшення онбордингу та відновлення зв'язку після перезавантаження вузлів мережі. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх імплементації на існуючій елементній базі бездротового обладнання без необхідності критичного здорожчання апаратної частини.

**Ключові слова:** бездротові Mesh-мережі, Wi-Fi 7, IEEE 1905.1, DFS CAC, Backhaul Steering, адаптивний онбординг, діапазон 6 ГГц.

**Постановка проблеми.** Сучасні телекомунікаційні системи є фундаментальною складовою критичної інфраструктури, що забезпечує функціонування цифрової економіки. Згідно зі щорічними звітами компанії Cisco [1], станом на 2023 рік близько 70% світового мобільного трафіку передається через Wi-Fi мережі, що робить цю технологію основним засобом «останньої милі». Однак стрімке зростання кількості IoT-пристроїв та вимоги до передачі «важкого» контенту (8K-відео, AR/VR) виявили суттєві обмеження пропускної здатності та радіусу дії існуючих стандартів. На

відповідь цим викликам було розроблено стандарт IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), який пропонує революційні зміни у фізичному рівні передачі даних, зокрема використання діапазону 6 ГГц, а та збільшення ширини каналу до 320 МГц. Проте основним недоліком високочастотних бездротових мереж залишається швидке загасання сигналу при проходженні крізь перешкоди. Для вирішення цієї проблеми використовується технологія Mesh, принципи якої стандартизовані Wi-Fi Alliance у специфікації EasyMesh v6.0 [3]. Незважаючи на прогрес, складність керування такими розподіле-



ними системами значно зросла. Критичною проблемою залишається процес онбордингу – первинного підключення та авторизації нових вузлів.

Традиційні методи в діапазоні 5 ГГц стикаються з вимушеними паузами через роботу механізмів DFS, що створює проблему із довгим очікуванням ініціалізації для користувача. Розв'язання цієї проблеми має важливе практичне значення для створення надійних самовідновлюваних мереж у домашніх та корпоративних умовах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання підвищення продуктивності бездротових мереж нового покоління є предметом активних досліджень. У роботі Лю (Liu) та ін. [3] проведено детальний огляд архітектури IEEE 802.11be, де автори наголошують на критичному значенні розширення спектру до 7.125 ГГц. Лопес-Перес (Lopez-Perez) та ін. [4] поглиблюють цей аналіз, вказуючи, що нові функції ЕНТ (Extremely High Throughput) дозволяють досягти теоретичних швидкостей до 46 Гбіт/с.

Особливості побудови Mesh-мереж для Інтернету речей (IoT) розглядає Караш (Qarash) [5], акцентуючи на важливості самоорганізації вузлів. «Проте, як зазначають Джус (Dzhus) та Лобур (Lobur) [6], час збіжності протоколів маршрутизації Mesh-мережі другого рівня (Layer 2) може досягати 45 секунд. Якщо розглядати типовий сценарій побудови магістрального каналу в діапазоні 5 ГГц, до цієї затримки додається обов'язкова процедура перевірки доступності каналу (CAC), яка згідно з вимогами стандарту ETSI EN 301 893 [8], яка створює гарантовану затримку («мертву зону») у комунікації тривалістю мінімум 60 секунд (а для погодних радарів – до 10 хвилин). Ураховуючи час фізичного завантаження пристрою, сумарна тривалість відновлення зв'язку може перевищувати 2 хвилини, а в деяких випадках час відновлення може перевищувати 12 хвилин. Такий значний час простою (Downtime) під час перезавантаження або оновлення екстендера є критичним недоліком, що руйнує користувацький досвід та неприпустимий для сучасних мультимедійних сервісів.

Більшість сучасних робіт пропонують вирішувати це за допомогою технології Multi-Link Operation (MLO). Однак, як показують дослідження Карраскоса-Замакое (Carrascosa-Zamacois) та ін. [8], MLO може призводити до неочікуваних аномалій затримки та ефекту «голодування» (starvation) каналів- критичну ситуацію, за якої передача даних блокується через розсинхронізацію доступу до середовища або неефек-

тивний розподіл черг між радіоінтерфейсами. Крім того, технічна документація Cisco [9] прямо вказує на економічні бар'єри цього підходу: необхідність використання складної апаратної бази для режиму STR призводить до значного подорожчання обладнання та критичного підвищення енергоспоживання. Водночас, експериментальні дослідження Алаутмана (Alauthman) та Шраа (Shraa) [10] підтверджують, що в умовах високої щільності пристроїв навіть Wi-Fi 7 страждає від критичного зростання джитеру та конкуренції за канал, що нівелює переваги низької затримки без додаткових алгоритмів оптимізації

Альтернативні методи, проаналізовані Лі (Lee) та ін. [11], які базуються на технології Wi-Fi Aware (NAN), є енергоефективними, але придатні лише для процедур виявлення сервісів (Service Discovery) та підключення низькошвидкісних IoT-пристроїв, і не можуть гарантувати стабільність магістральних каналів (Backhaul) високої навантаженості.

Іншим підходом є використання механізму Puncturing, описаного у технічних звітах Qualcomm [12], який дозволяє «вирізати» вузьку смугу частот, зайняту завадою, не втрачаючи весь канал. Однак цей метод вирішує проблему інтерференції під час роботи, а не проблему початкової затримки (DFS CAC)

Таким чином, фундаментом для розв'язання проблеми має стати використання протоколу IEEE 1905.1 [13]. Цей стандарт вводить рівень абстракції (Abstraction Layer), що дозволяє об'єднати різноманітні фізичні інтерфейси (Wi-Fi 2.4/5/6 ГГц, Ethernet) у єдиний віртуальний канал зв'язку. Ефективність цього підходу підтверджується специфікацією Wi-Fi EasyMesh [2, с. 27], яка використовує кадрову структуру IEEE 1905.1 як обов'язковий механізм для обміну повідомленнями управління та ідентифікації пристроїв через віртуальні AL MAC-адреси, нівелюючи тимчасову нестабільність окремих радіоканалів

**Постановка завдання.** Метою роботи є підвищення ефективності розгортання та стабільності функціонування бездротових Mesh-мереж стандарту IEEE 802.11be шляхом розробки методу прискореної організації магістральних каналів зв'язку (Backhaul) на основі двоетапного адаптивного онбордингу, що дозволяє мінімізувати часові затримки, зумовлені процедурами DFS CAC.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати архітектуру Multi-AP та можливості протоколу IEEE 1905.1 для керування топологією.

2. Розробити алгоритм адаптивного вибору каналу (Backhaul Steering) з використанням діапазону 6 ГГц для швидкого старту.

3. Обґрунтувати порогові значення рівня сигналу для перемикавання між діапазонами з урахуванням затухання в перешкодах.

4. Оцінити вигреш у часі при ініціалізації мережі за допомогою запропонованого методу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Згідно зі специфікацією EasyMesh v6.0 [2], архітектура мережі базується на розподілі ролей між двома логічними сутностями:

- Multi-AP Controller – центральний вузол, що реалізує алгоритми керування (Control Plane).
- Multi-AP Agent – виконавчий елемент, що транслює команди контролера.

Їхню взаємодію можна побачити на рисунку 1

Фізична зв'язність мережі забезпечується через магістральні канали (Backhaul links). Як

показано на схемі, Multi-AP пристрій 2 підключається до кореневого вузла (Multi-AP пристрій 1) за допомогою Backhaul STA (станції) або через логічний Ethernet-порт. Така деревоподібна топологія дозволяє масштабувати покриття, зберігаючи єдиний логічний простір керування.

Доступ кінцевих користувачів (Клієнт 1, Клієнт 2) до мережі реалізується через інтерфейси Fronthaul AP. Обмін службовою інформацією між Контролером та Агентами відбувається через логічний інтерфейс керування (Multi-AP control interface), який функціонує поверх будь-якого доступного фізичного середовища (L2 bridging), забезпечуючи передачу метрик та команд керування незалежно від типу з'єднання.

Критично важливою частиною Multi-AP є протокол IEEE 1905.1 [13], який створює рівень абстракції (Abstraction Layer – AL). Цей рівень дозволяє приховати від верхніх рівнів моделі

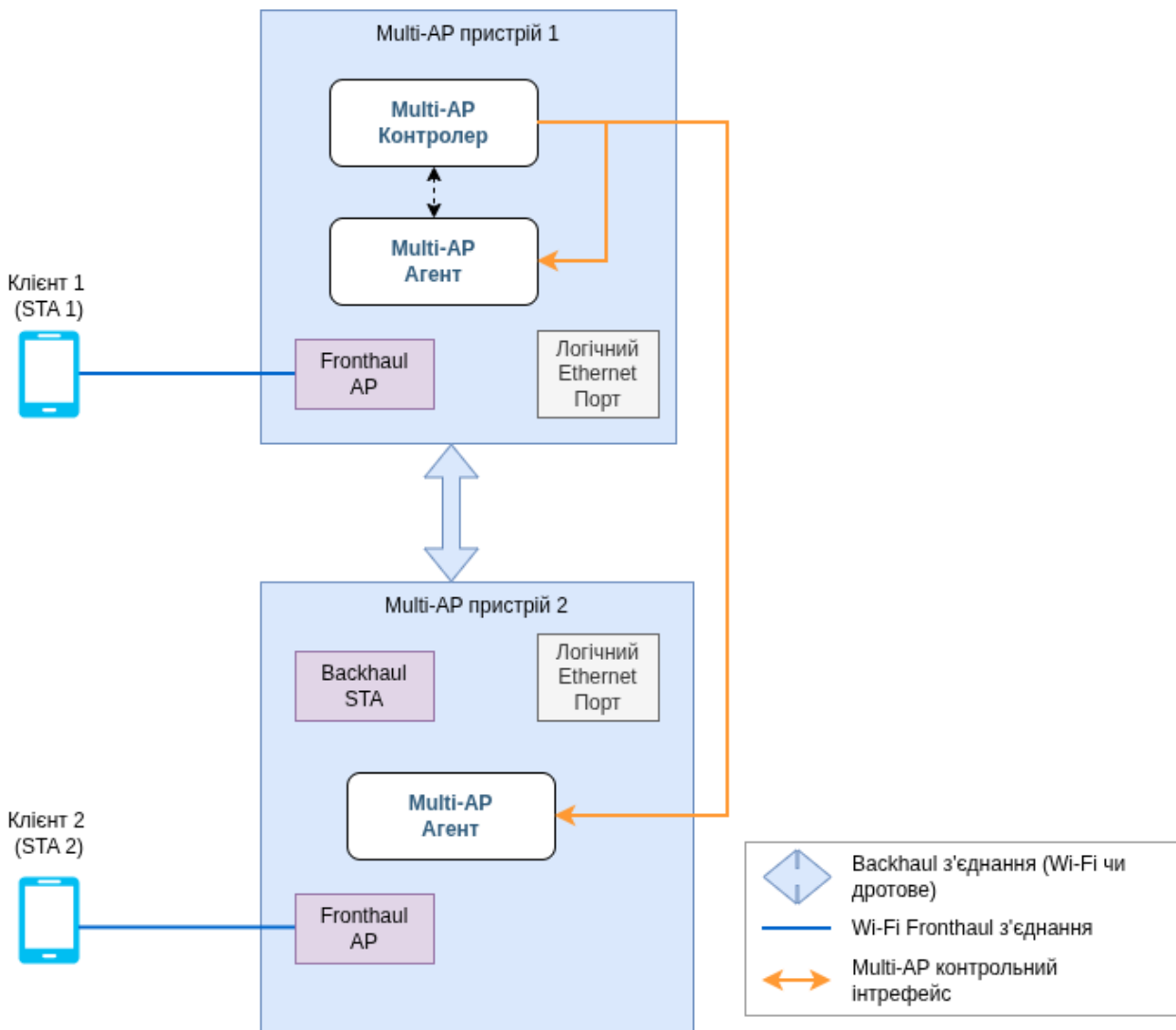


Рис. 1. Архітектура Multi-AP мережі

OSI фізичну природу каналу передачі даних, об'єднуючи Wi-Fi та Ethernet у єдиний логічний інтерфейс. Саме через пакети цього протоколу будуть відбуватись основні процеси методу зміни магістрального каналу зв'язку (Backhaul)

Загалом в цьому процесі можна використати наступні кадри керування (CMDU – Control Message Data Unit), які забезпечують збір метрик та перемикавання лінків. Перелік задіяних повідомлень наведено в Таблиці 1.

Суть запропонованого методу полягає у відмові від статичного вибору каналу на користь динамічної моделі кінцевого автомата (State Machine), що дозволяє системі динамічно адаптуватися до змін радіосередовища. Логіка роботи спрямована на мінімізацію часу розгортання мережі (“швидкий старт”) та забезпечення надійності з'єднання в умовах нестабільного покриття.

Процес функціонування системи можна розділити на чотири ключові етапи:

#### 1. Етап ініціалізації (Fast Start)

Алгоритм починається з моменту подачі живлення на пристрій. Пріоритетним завданням є якнайшвидше встановлення зв'язку.

– Система виконує сканування діапазону 6 ГГц (UNII-5).

– Здійснюється перевірка умови  $RSSI\ 6\ ГГц > Min$ , де  $Min$  – мінімально допустимий рівень сигналу для встановлення стабільного лінку.

– Оскільки діапазон 6 ГГц не вимагає процедури перевірки на наявність радарів (DFS/CAC), у разі задовільного рівня сигналу з'єднання встановлюється миттєво. Це дозволяє уникнути затримки у 60+ секунд, характерної для діапазону 5 ГГц.

#### 2. Режим активної роботи на 6 ГГц (Primary State)

Це основний і найбільш бажаний режим роботи, що забезпечує найвищу пропускну здатність та найменші затримки.

– Фонова підготовка:

Під час передачі даних основним каналом, Агент у фоновому режимі сканує діапазон 5 ГГц. Головна мета – пройти процедуру CAC (Channel Availability Check) тривалістю від 60 до 600 секунд. Це необхідно для того, щоб у разі погіршення

зв'язку на 6 ГГц резервний канал 5 ГГц був уже “чистим” і готовим до миттєвого перемикавання.

– Умова переходу

Перемикавання на резервний канал 5 ГГц відбувається лише при виконанні двох умов одночасно:

- Поточний рівень сигналу 6 ГГц впав нижче критичного порогу ( $RSSI < Порог$ )
- Процедура CAC для 5 ГГц успішно завершена.

Якщо умови виконано – ініціюється процедура Steering (перемикавання) на 5 ГГц. Якщо ні – система залишається на 6 ГГц, продовжуючи спроби підготувати резервний канал.

#### 3. Режим активної роботи на 5 ГГц (Fallback State)

Цей режим використовується як резервний (Fallback) для забезпечення покриття у зонах, де сигнал 6 ГГц занадто слабкий (через швидке затухання високочастотного сигналу крізь стіни).

– Моніторинг:

Перебуваючи на каналі 5 ГГц, система безперервно прослуховує Beacon-кадри діапазону 6 ГГц, щоб виявити момент покращення умов (наприклад, переміщення користувача ближче до точки доступу або зникнення перешкоди).

– Умова повернення:

Для запобігання ефекту “флапінгу” (частого перемикавання туди-сюди), повернення на пріоритетний діапазон 6 ГГц відбувається лише за умови стабільності сигналу.

Перевіряється умова:  $RSSI\ 6G > Порог$  та сигнал має залишатися стабільним протягом захисного інтервалу часу ( $> 10\ с$ ).

#### 4. Механізм перемикавання (Steering)

Центральним елементом схеми є процес перемикавання каналів, який з'єднує два активні стани. Завдяки використанню протоколу IEEE 1905.1 (повідомлення Backhaul Steering Request), перехід здійснюється безшовним для кінцевого користувача, оскільки резервний канал готується заздалегідь (у випадку переходу із 6 ГГц на 5 ГГц) або є доступним миттєво (у випадку з 5 ГГц->6 ГГц).

Блок-схема розробленого алгоритму наведена на рисунку 2.

Таблиця 1

Типи CMDU пакетів IEEE 1905.1 для зміни магістрального каналу (Backhaul)

| Message Type (Hex) | Назва повідомлення           | Призначення                                              |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 0x0002             | Topology Discovery           | Виявлення вузлів та побудова топології при підключенні.  |
| 0x0005 / 0x0006    | Link Metric Query / Response | Моніторинг параметрів та стану активного каналу.         |
| 0x0008             | Channel Preference Report    | Звіт Агента про статус каналів.                          |
| 0x0009             | Backhaul Steering Request    | Команда Контролера на примусове перемикавання діапазону. |

Для формалізації алгоритму прийняття рішень необхідно визначити енергетичні параметри каналів зв'язку. Для визначення енергетичних параметрів каналів використаємо логарифмічну модель втрат сигналу у вільному просторі (FSPL). Залежність втрат від частоти ( $f$ , ГГц) та відстані ( $d$ , м) описується рівнянням:

$$FSPL_{db} = 20\lg(f) + 20\lg(d) + 20\lg\left(\frac{4\pi}{c}\right)$$

Де  $c$  – швидкість світла, звідки можна вирахувати, що константна складова  $20\lg\left(\frac{4\pi}{c}\right)$  буде рівна приблизно 32.44. Тоді робоче рівняння має вигляд:

$$FSPL_{db} = 20\lg(f) + 20\lg(d) + 32.44$$

Ключовим для алгоритму є розрахунок різниці загасання  $\Delta PL$  між діапазонами 6 ГГц та 5 ГГц, для зручності ми візьмемо центральні канали

в цих діапазонах, звідси їхня частота буде рівна  $f_2 \approx 6.2$ , а  $f_1 \approx 5.2$

$$\Delta PL = 20\lg\left(\frac{f_2}{f_1}\right) = 20\lg\left(\frac{6.2}{5.2}\right) \approx 1.53 \text{ дБм}$$

Враховуючи емпіричні коефіцієнти поглинання будівельних матеріалів (згідно з ITU-R P.1238) [14], реальна різниця енергетичного бюджету сягає  $\Delta PL \approx 4 \text{ дБм}$  на користь діапазону 5 ГГц.

Критичний поріг перемикання ( $T_{trigger}$ ) обрано на основі чутливості приймача для модуляції 16-QAM ( $S_{min} \approx -72 \text{ дБм}$  із запасом на завмирання ( $M = 5 \text{ дБм}$ ):

$$T_{trigger} = S_{min} + M = -67 \text{ дБм}$$

Вибір цього порогу зумовлений механізмом адаптивної модуляції (АМС). Падіння сигналу нижче  $-67 \text{ дБм}$  на частоті 6 ГГц призводить до

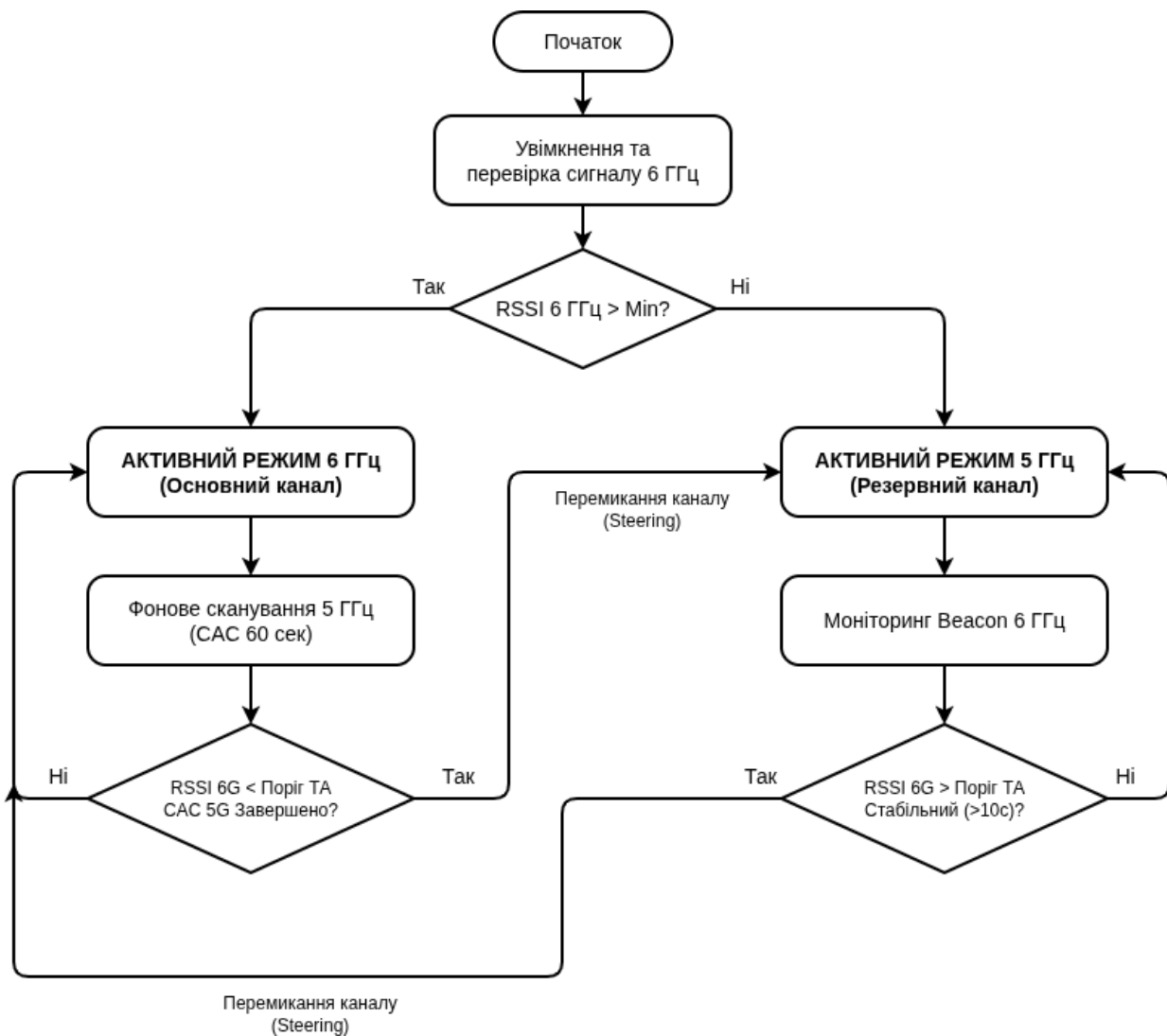


Рис. 2. Блок-схема алгоритму адаптивного керування станами Backhaul-з'єднання

переходу на низькошвидкісні режими (QPSK/BPSK). Перемикання на 5 ГГц дозволяє отримати енергетичний виграш у 4 дБ, підвищуючи ефективний рівень сигналу до -63 дБм. Це дає змогу контролеру відновити індекс модуляції до 64-QAM і зберегти високу пропускну здатність каналу.

Окрім стабілізації магістрального каналу, запропонований метод забезпечує значне скорочення часу розгортання мережі. У традиційних системах при першому ввімкненні або перезавантаженні екстендер (Agent) змушений очікувати завершення процедури CAC (Channel Availability Check) на частотах 5 ГГц, що створює період очікування для кінцевих користувачів

Повний час готовності системи до надання сервісу ( $T_{\Sigma}$ ) розраховується як сума затримок:

$$T_{\Sigma} = t_{boot} + t_{scam} + t_{assoc}$$

Де  $t_{boot}$  – Час завантаження операційної системи агента (приблизно 45с)

$t_{scam}$  – Час вибору та підготовки робочого каналу

$t_{assoc}$  – час авторизації та встановлення сесії IEEE 1905.1 (Приблизно 4с)

Для випадку із 5ГГц Backhaul, до часу вибору каналу додається ще час на сканування радару та клірення каналу, цей час може мати значення від 60 до 600 секунд

Тому, в такому випадку з найкращим сценарієм при паузі у 60 секунд, час готовності системи буде рівний:

$$T_{5ghz} = t_{boot} + t_{scam} + t_{assoc} = 45 + 60 + 4 = 109с$$

А от для випадку із початковою ініціалізацією з діапазоном 6ГГц, підготовка каналу не потребує DFS сканування і час для неї буде рівним часу активного сканування Beacon фреймів (приблизно 0.2с)

$$T_{5ghz} = t_{boot} + t_{scam} + t_{assoc} = 45 + 0.2 + 4 = 49.2с$$

Хоч зараз можливо різниця здається не суттєвою, проте якщо розрахувати коефіцієнт пришвидшення ініціалізації, то він покаже наступне:

$$K_{speed} = \frac{T_{6ghz}}{T_{5ghz}} = \frac{109}{49.2} = 2.22$$

Алгоритм пришвидшив ініціалізацію в 2 рази, і зрозуміло, що при збільшенні паузи для сканування радару в 5ГГц, цей коефіцієнт буде зростати, що в рази пришвидшить ініціалізацію, при довгому DFS скануванні.

**Висновки.** У результаті дослідження розроблено метод двоетапного адаптивного онбордингу вузлів Mesh-мереж Wi-Fi 7, який за рахунок використання протоколу IEEE 1905.1 та пріоритетизації діапазону 6 ГГц дозволяє повністю нівелювати затримки DFS CAC під час запуску системи. Математично доведено, що запропонований підхід забезпечує стабільність модуляції в умовах перешкод та прискорює ініціалізацію мережі у 2.22–13.1 рази порівняно з традиційними методами. Практична цінність роботи полягає у можливості програмної імплементації алгоритму на базі відкритих систем керування (OpenWrt/prpLOS) без залучення дорогої апаратної підтримки режиму STR MLO. Це дозволяє виробникам мережевого обладнання суттєво покращити показники якості досвіду (QoE) для кінцевих користувачів, забезпечуючи безшовне відновлення сервісів та стабільність магістральних каналів у складних архітектурних умовах без збільшення собівартості пристроїв. Подальші дослідження рекомендують зосередити на інтеграції моделей штучного інтелекту для інтелектуального прогнозування змін радіосередовища, що дозволить динамічно коригувати моменти переходу між діапазонами на основі предиктивного аналізу поведінки користувачів та зовнішніх завад

#### Список літератури:

1. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. Cisco Systems, Inc. 2020. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>.
2. Wi-Fi Alliance. Wi-Fi Certified EasyMesh: Multi-AP Specification v6.0. Wi-Fi Alliance Technology Group. 2023. 184 p. URL: <https://www.wi-fi.org/file/wi-fi-easy-mesh-specification-v6-0>.
3. Liu X., Dong Y., Li Y., Lin Y. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature Summary and Performance Evaluation. arXiv preprint arXiv:2309.15951. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.15951>.
4. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L. et al. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology. IEEE Communications Magazine. 2019. Vol. 57, Is. 9. P.113–119. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338>.
5. Qarash S. Wireless Mesh Networks (WMN) in IoT Networks. Journal of Science and Technology. 2024. Vol. 30, No. 1. P. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.20428/jst.v30i1.2572>.
6. Dzhus O., Lobur M. Simulation of the availability and initialization speed of a layer 2 mesh network. CEUR Workshop Proceedings. 2025. Vol. 4145. P. 46–57. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4145/paper4.pdf>.

7. ETSI EN 301 893 V2.1.1. 5 GHz RLAN; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. European Telecommunications Standards Institute (ETSI). 2017. URL: <https://www.etsi.org/>.
8. Carrascosa-Zamacois M. et al. Understanding Multi-Link Operation in Wi-Fi 7: Performance, Anomalies, and Solutions. 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. (PIMRC). 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/PIMRC56721.2023.10293865>.
9. Cisco Meraki. Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide. Cisco Systems Documentation. 2024. URL: [https://documentation.meraki.com/Wireless/Design\\_and\\_Configure/Architecture\\_and\\_Best\\_Practices/Wi-Fi\\_7\\_\(802.11be\)\\_Technical\\_Guide](https://documentation.meraki.com/Wireless/Design_and_Configure/Architecture_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_(802.11be)_Technical_Guide).
10. Alauthman A., Shraa T. Performance Evaluation and Latency Optimization of Wi-Fi 7 in High-Density Wireless Environments. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*. 2025. Vol. 14, No. 6. P. 354–364. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijeetc.14.6.354-364>.
11. Lee B. M., Patil M., Hunt P., Khan I. An Easy Network Onboarding Scheme for Internet of Things Networks. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 8763–8772. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2890072>.
12. Brand S. How Wi-Fi 7 adaptive puncturing in DFS channels can maximize mesh performance in the 5GHz band. Qualcomm OnQ Blog. 2023. URL: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2023/03/how-wi-fi-7-adaptive-puncturing-in-dfs-channels-can-maximize-mesh-performance>
13. IEEE Std 1905.1-2013. IEEE Standard for a Convergent Digital Home Network for Heterogeneous Technologies. IEEE Power Line Communications Standards Committee. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6502164>
14. TU-R P.1238-11. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz. Geneva: International Telecommunication Union, 2021. 34 p

#### **Haidar Yu.B. METHOD FOR ACCELERATED ORGANIZATION OF IEEE 802.11be MESH NETWORKS WITH ADAPTIVE BACKHAUL CHANNEL SELECTION**

*The article addresses the urgent scientific and practical task of increasing the efficiency of deployment and operation of next-generation wireless Mesh networks based on the Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) standard. The primary focus is on mitigating time delays occurring during the initial initialization of backhaul links in the 5 GHz band. It has been established that the mandatory Dynamic Frequency Selection Channel Availability Check (DFS CAC) procedure, which lasts from 60 to 600 seconds, creates critical network downtime periods («dead zones»). This downtime negatively impacts the Quality of Experience (QoE) and the stability of high-bandwidth multimedia services.*

*A method for accelerated Mesh network organization is proposed and scientifically substantiated, based on the implementation of a two-stage adaptive node onboarding algorithm. Unlike existing solutions that rely on complex hardware implementations of Multi-Link Operation (MLO STR) technology, the developed method utilizes the IEEE 1905.1 abstraction layer for dynamic topology management via a Backhaul Steering mechanism. The core of the method lies in the prioritized use of the 6 GHz (UNII-5) band for instantaneous connection establishment during system startup (Fast Start), while concurrently delegating the preparation of energy-efficient 5 GHz channels to a background operation mode.*

*The study includes mathematical modeling of link energy parameters based on a logarithmic free-space path loss model. A critical signal level threshold of -67 dBm was determined, at which a proactive switch to the backup band is initiated to maintain highly efficient 64-QAM modulation. It has been established that this approach provides an additional energy gain of 4 dB under conditions of signal attenuation caused by physical obstacles. Computational results demonstrate that the implementation of the proposed algorithm reduces the total initialization time by 2.22 to 13.1 times, depending on the DFS scanning delay. These findings confirm the feasibility of the method for accelerating onboarding and connection recovery following network node reboots. The practical significance of the results lies in the possibility of their implementation on existing wireless hardware without the need for significant hardware cost increases.*

**Keywords:** wireless Mesh networks, Wi-Fi 7, IEEE 1905.1, DFS CAC, Backhaul Steering, adaptive onboarding, 6 GHz band.

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Галицький І.І.**

<https://orcid.org/0009-0002-2209-4354>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Живков О.П.**

<https://orcid.org/0000-0002-0242-1971>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МІКРОХВИЛЬОВІ СЕНСОРИ НА БАЗІ КОМІРОК МЕТАМАТЕРІАЛІВ

У статті розглядаються сучасні підходи до створення мікрохвильових сенсорів на основі комірок метаматеріалів. Завдяки унікальним електромагнітним властивостям, які не зустрічаються в природних матеріалах, метаматеріали відкривають нові можливості в області високочутливої сенсорики. Особливу увагу приділено застосуванню таких сенсорів в Інтернеті речей (IoT), телекомунікаційних системах, бездротовому моніторингу та спектроскопії. У роботі також висвітлено фізичні принципи побудови сенсорів, типи структур, а також ефекти, що підвищують чутливість – зокрема, резонанс Фано, електромагнітно індукована прозорість та ефект Парселла. Представлено історію розвитку концепції метаматеріалів та її еволюцію в контексті сенсорних застосувань.

Окремий розділ присвячено класифікації метаматеріальних сенсорів за конструктивними особливостями, способом зчитування інформації, робочим частотним діапазоном та характером взаємодії з досліджуванним середовищем. Розглянуто сенсори на основі *split-ring resonators*, електромагнітних поглиначів, ЕІТ- та Фано-структур, а також мультирезонансні та пасивні бездротові сенсорні системи. Проаналізовано загальні принципи їх функціонування з використанням еквівалентних LC-моделей і параметрів S-матриці.

Значну увагу приділено використанню інтерференційних ефектів та мостових вимірювальних схем, які дозволяють суттєво підвищити роздільну здатність і стабільність сенсорних вимірювань, зменшити вплив шумів і температурного дрейфу. Наведено приклади практичної реалізації мікрохвильових резонансних та сенсорних структур, у яких експериментально продемонстровано ефекти Фано та електромагнітно індукованої прозорості. Показано, що запропоновані підходи є перспективними для створення компактних, енергоефективних і високочутливих сенсорів нового покоління для телекомунікаційних та IoT-платформ.

**Ключові слова:** метаматеріали, мікрохвильові сенсори, спліт-ринг резонатор (SRR), комплементарний спліт-ринг резонатор (CSRR), інтерференційні резонанси, резонанс Фано, електромагнітно індукована прозорість (ЕІТ), ефект Парселла, мікросмужкові структури, мостові вимірювальні схеми, Інтернет речей (IoT), телекомунікації, мікрохвильові фільтри, високочутливі сенсори.

**Постановка проблеми.** Розвиток телекомунікаційних систем, Інтернету речей (IoT) та бездротового моніторингу потребує створення компактних, енергоефективних і високочутливих сенсорів. Традиційні мікрохвильові сенсори часто мають обмежену чутливість і недостатню селективність. Використання комірок метаматеріалів дозволяє значно підвищити локалізацію електромагнітного поля та реалізувати резонансні

ефекти з високою добротністю, однак практичні принципи побудови таких сенсорів і методи підвищення їх чутливості потребують подальшого аналізу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наукових роботах активно досліджуються метаматеріальні структури для мікрохвильової сенсорики, зокрема сенсори на основі *split-ring resonators*, електромагнітних поглиначів та мета-



поверхонь. Значну увагу приділено використанню резонансу Фано, електромагнітно індукованої прозорості та високодобротних резонаторів для підвищення роздільної здатності вимірювань. Окремі дослідження присвячені пасивним і бездротовим сенсорам для IoT, проте узагальнений підхід до поєднання резонансних ефектів і вимірювальних схем залишається актуальним.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз фізичних принципів роботи мікрохвильових сенсорів на базі комірок метаматеріалів та демонстрація ефективних підходів до підвищення їх чутливості. У роботі розглядаються типи метаматеріальних сенсорів, інтерференційні резонансні ефекти (Фано, ЕПП, ефект Парсела), мостові схеми зчитування сигналу, а також приклади практичної реалізації сенсорних структур.

**Виклад основного матеріалу.** З розвитком технологій Інтернету речей (IoT), телекомунікацій та автоматизованих систем моніторингу виникає потреба у високочутливих, компактних та енергоефективних сенсорах. Традиційні методи побудови мікрохвильових сенсорів мають обмеження щодо габаритів, чутливості та можливостей інтеграції з бездротовими технологіями. У цьому контексті особливу увагу дослідників привертають метаматеріали – штучно створені структури, що демонструють виняткові електромагнітні властивості, такі як від’ємна діелектрична проникність або магнітна сприйнятливість, або ж надзвичайно висока локалізація електромагнітного поля. Використання метаматеріалів у сенсорних системах дозволяє створювати надчутливі резонансні елементи, здатні реагувати на мінімальні зміни навколишнього середовища, як-от зміни температури, вологості, складу газів або біохімічних речовин. Особливої актуальності набувають метаматеріальні сенсори, що працюють у мікрохвильовому діапазоні, який є базовим для більшості телекомунікаційних протоколів, включно з Wi-Fi, 5G та іншими стандартами.

#### **Історія з’явлення метаматеріальних сенсорів**

Поняття метаматеріалів з’явилося на межі XX і XXI століття. Одним із перших, хто теоретично передбачив існування матеріалів із від’ємним показником заломлення, був Джон Пендрі (J. B. Pendry), а перші експериментальні підтвердження належать Девіду Сміту (D. R. Smith) і співавторам [1-2]. У 2000-х роках вони запропонували і реалізували структури, що мали від’ємну ефективну проникність і діелектричну сприйнятливість у мікрохвильовому діапазоні. Такі структури формувалися зі штучних комірок – напри-

клад, кільцевих розрізних резонаторів (SRR) та провідникових стрижнів [3]. Хоча спочатку дослідження метаматеріалів були орієнтовані на створення «невидимих» матеріалів або надлінз, досить швидко стало зрозуміло, що їх здатність до високої локалізації електромагнітного поля може бути використана у сенсоріці [4]. Резонансні структури на базі метаматеріалів виявилися надзвичайно чутливими до змін діелектричного середовища, що дало поштовх до розвитку нового класу сенсорів – метаматеріальних. З часом метаматеріальні сенсори почали інтегрувати з мікросмушковими лініями, антенними структурами, резонансними модулями, і навіть з біосенсорами. Особливо активно ці розробки стали розвиватися після 2010 року, коли було опубліковано низку робіт про мікрохвильові сенсори з високою добротністю на базі асиметричних мета-комірок, що реалізовували резонанс Фано. Сьогодні метаматеріальні сенсори використовуються не лише в науці, але й у промислових і медичних застосуваннях, а також в системах розумного середовища – smart home, smart city, wearable IoT.

#### **Перспективи використання метаматеріальних сенсорів у телекомунікаціях та IoT**

Сучасний розвиток Інтернету речей (IoT) та майбутніх телекомунікаційних систем шостого покоління (6G) вимагає революційного підходу до побудови сенсорних систем. У зв’язку з потребою в мільйонах компактних, автономних і безперебійно працюючих сенсорів на квадратний кілометр, класичні сенсори з автономними джерелами живлення, складною електронікою та потребою в обслуговуванні стають непрактичними. Метаматеріальні сенсори [5] – зокрема, ті, що працюють у мікрохвильовому діапазоні – відкривають нові перспективи. Вони можуть здійснювати одночасно і сенсинг, і передачу інформації за допомогою зміни своїх електромагнітних характеристик (наприклад, коефіцієнта відбиття). Такі сенсори не потребують зовнішнього живлення, оскільки працюють як пасивні елементи, що модулюють відбитий сигнал залежно від умов навколишнього середовища.

У статті [6] запропонована концепція Meta-IoT системи – бездротової сенсорної мережі, побудованої на основі метаматеріалів, яка дозволяє одночасно здійснювати вимірювання фізичних параметрів середовища та передавати інформацію про них через зміну відбитого сигналу.

Сенсори Meta-IoT складаються з метаструктур (наприклад, split-ring resonators – SRR), об’єднаних з матеріалами, чутливими до температури або вологості.

Meta-IoT-сенсори не містять традиційних електронних передавачів: інформація зчитується через аналіз коефіцієнта відбиття, що змінюється під впливом температури, вологості, концентрації газів тощо. Для досягнення високої точності автори запропонували алгоритм спільної оптимізації геометрії сенсора і функції зчитування сигналу.

Meta-IoT сенсори встановлюються на поверхні, наприклад стіні; зчитування здійснюється за допомогою бездротового передавача/приймача. Алгоритм використовує модель відбиття з урахуванням паразитних ємностей, індуктивностей та властивостей чутливих матеріалів.

Було показано, що точність сенсорної системи покращується при оптимальному виборі геометрії (ширина щілин у SRR) та достатній потужності сигналу.

Зі зростанням потужності сигналу зменшується похибка вимірювання – особливо для оптимізованої структури.

Зі збільшенням відстані точність знижується. Це важливо враховувати при проектуванні мережі.

Метаматеріальні сенсори мають значний потенціал для IoT та 6G-комунікацій. Вони поєднують високу чутливість, пасивну роботу, мініатюризацію та здатність до масової інтеграції у великі бездротові системи. Стаття [6] демонструє, що використання таких структур у сенсорних мережах може суттєво підвищити ефективність, зменшити споживання енергії та забезпечити масштабованість майбутніх IoT-рішень.

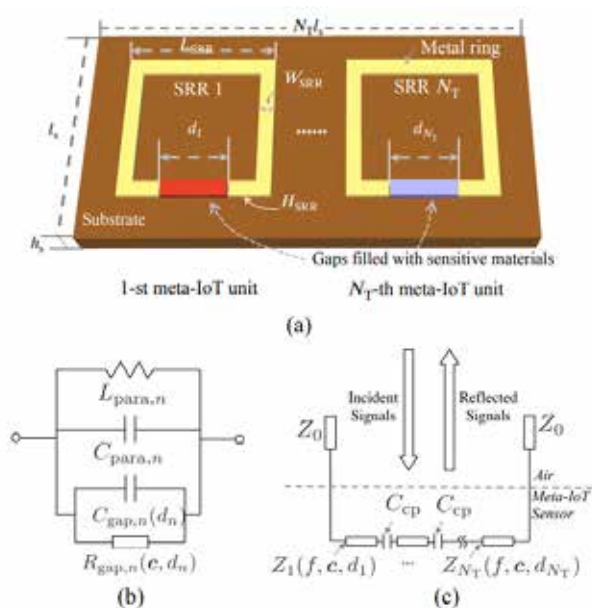


Рис. 1. (а) – конструкція з SRR на підкладці;  
(б) – еквівалентна RLC-схема елемента;  
(с) – загальна модель відбиття

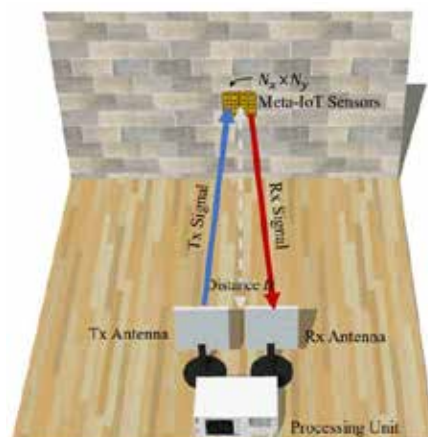


Рис. 2. Узагальнена схема Meta-IoT системи

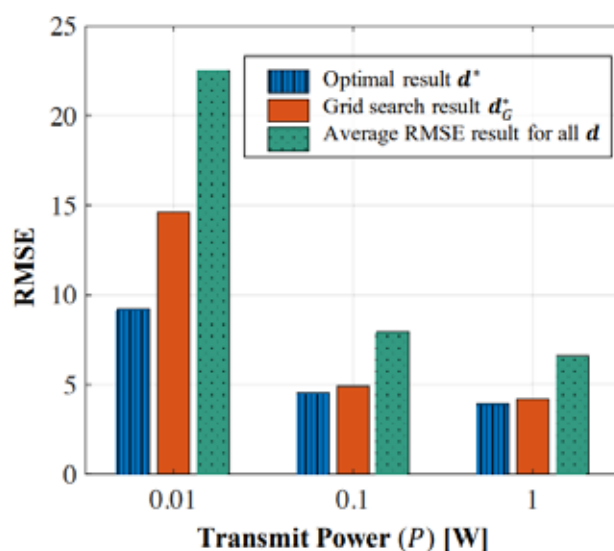


Рис. 3. Похибка (RMSE) залежно від потужності передавача

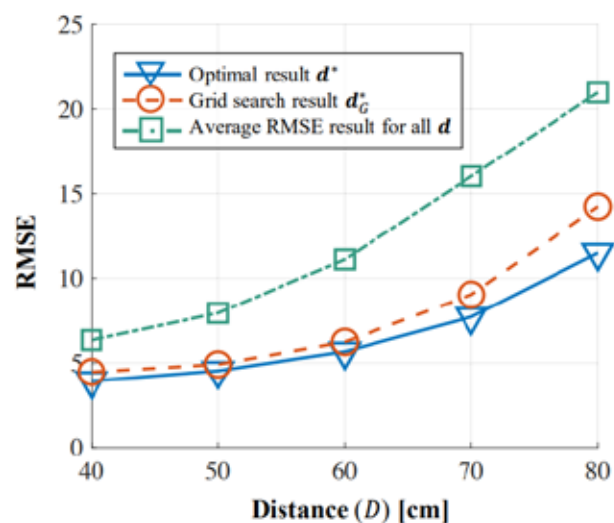


Рис. 4. Похибка (RMSE) залежно від відстані між передавачем і сенсором

### Типи метаматеріальних сенсорів

Метаматеріальні сенсори класифікуються за кількома критеріями: за типом резонансної структури, способом зчитування інформації, за діапазоном роботи та за способом взаємодії з навколишнім середовищем [7]. У цьому розділі наведено основні типи таких сенсорів, які застосовуються в мікрохвильовій сенсористиці, IoT та телекомунікаційних технологіях.

За конструкцією та принципом дії:

а) Сенсори на основі split-ring resonators (SRR)

SRR (кільцеві резонатори з розривом) є найбільш поширеним елементом у метаматеріальних сенсорах. Вони формують вузькосмуговий резонанс, який є надзвичайно чутливим до змін діелектричного середовища поблизу структури. Найчастіше використовуються для вимірювання вологості, температури, складу газів тощо [5].

б) Сенсори на основі електромагнітних поглиначів (Perfect Metamaterial Absorbers)

Ці сенсори мають повне поглинання мікрохвиль у резонансі. Зміна властивостей середовища призводить до зсуву частоти максимального поглинання, що використовується як інформативний параметр. Часто застосовуються в бездротових або чиплес-системах [8].

в) Електромагнітно-індуковані прозорі сенсори (EIT-type)

Імітують квантовий ефект електромагнітно індукованої прозорості. В таких структурах виникає вузька прозора смуга в межах ширшого поглинання завдяки інтерференції. Такі сенсори мають надвисоку добротність і придатні для надчутливих застосувань [10].

г) Мультирезонансні сенсори

Складаються з кількох різних метаструктур або каскадованих елементів, кожен з яких налаштований на власну резонансну частоту.

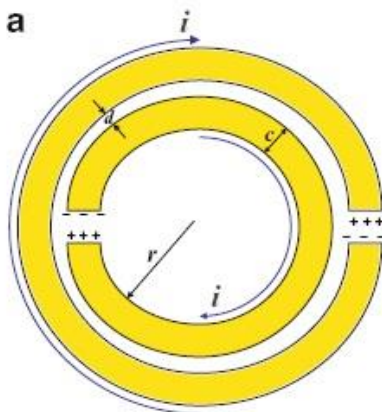


Рис. 5. Класичний SRR-елемент у метаматеріалі

Це дозволяє проводити одночасний моніторинг кількох параметрів – наприклад, температури та вологості [10].

За способом зчитування інформації:

а) Пасивні сенсори з відбиттям (Reflective sensing)

Найбільш перспективний клас для IoT. Не потребують живлення. Інформація зчитується з аналізу коефіцієнта відбиття від структури ( $S_{11}$  або  $S_{21}$  параметри), що змінюється залежно від навколишнього середовища [9].

б) Сенсори з інтегрованими чипами (Active or semi-passive)

Поєднують метаструктури з активними електронними компонентами: наприклад, діодами, сенсорними мікросхемами або мікроконтролерами. Використовуються в гібридних системах, де потрібна вища інтеграція з обчислювальними блоками [9].

За діапазоном частот:

- Мікрохвильові (GHz) – найпоширеніші, оптимальні для телекомунікацій та бездротових мереж.

- Терагерцові (THz) – перспективні для біомедичних застосувань, безконтактного сканування та хімічної спектроскопії.

- Оптичні метаматеріальні сенсори – працюють у видимому чи ближньому ІЧ-діапазоні, здебільшого використовуються в нанофотоніці.

За способом взаємодії із середовищем

- Контактні сенсори – матеріал або середовище безпосередньо розміщується на поверхні сенсора (наприклад, полімер, який поглинає вологу).

- Бездротові / безконтактні – зчитують зміни на відстані; використовуються для моніторингу поверхонь, конструкцій, стану середовища.

### Загальні принципи побудови метаматеріальних сенсорів

Метаматеріальні сенсори ґрунтуються на принципах резонансної взаємодії електромагнітного поля з періодичними або квазіперіодичними структурами, здатними концентрувати та локалізувати енергію поля в малих об'ємах. Основним елементом таких сенсорів є резонатор (наприклад, split-ring resonator – SRR, complementary SRR, electric-LC, Jerusalem cross тощо), частота резонансу якого залежить від параметрів навколишнього середовища [7], [10].

#### 1. Основний принцип роботи

Коли електромагнітна хвиля взаємодіє з метаструктурою, у ній формується резонансна відповідь, що характеризується трьома головними параметрами:

1. **Резонансна частота ( $f_0$ )** – частота, на якій структура поглинає або відбиває максимум енергії. Будь-яка зміна діелектричної проникності ( $\epsilon$ ) або магнітної проникності ( $\mu$ ) поблизу структури змінює ефективні параметри її LC-ланцюга:  $f_0 = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$ . Збільшення діелектричної сталої середовища (наприклад, при підвищенні вологості) збільшує ємність  $C$  і зменшує частоту резонансу  $f_0$  [8], [9].

2. **Добротність (Q-factor)** – показник енергетичних втрат у структурі. Вона зменшується, якщо в середовищі зростають втрати (наприклад, через появу поглинаючих частинок у газовій суміші) [6].

3. **Амплітуда ( $S_{11}$  або  $S_{21}$ )** – відображає інтенсивність взаємодії структури з сигналом. Зміна амплітуди може бути інформативною при деформаціях або при контакті сенсора з різними матеріалами [11], [12].

## 2. Приклади застосувань

1. Сенсор вологості – Збільшення вологості призводить до адсорбції водяної пари на чутливому шарі (наприклад, полімерному). Це підвищує діелектричну проникність середовища  $\rightarrow$  ємність SRR зростає  $\rightarrow$  резонансна частота зменшується.

2. Сенсор складу газу – Заміна газового середовища (наприклад, повітря  $\rightarrow$   $\text{CO}_2$  або  $\text{CH}_4$ ) змінює показник заломлення поблизу резонатора. Це спричиняє невелике зміщення частоти та зміни добротності.

3. Сенсор деформації або тиску – Якщо метаструктура розміщена на гнучкій підкладці, механічне розтягнення змінює геометричні параметри (розрив, радіус кільця), що впливає на індуктивність і ємність.

4. Біосенсорика – Прикріплення біомолекул до поверхні змінює локальну діелектричну постійну, що викликає зсув резонансної частоти або зміну глибини резонансного мінімуму.

## 3. Еквівалентна модель

Роботу метаматеріального сенсора часто описують як LC-резонатор, де:  $L$  – індуктивність провідних елементів (кілець, рамок),  $C$  – ємність між щільностями або елементами структури,  $R$  – ефективний опір, що описує втрати. Кожен параметр може змінюватися при впливі зовнішніх факторів (температури, вологості, тиску), що викликає зсув частоти, зміну добротності або амплітуди відбиття.

## 4. Методи зчитування інформації

- S-параметри ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ) – вимірюються за допомогою векторного аналізатора мереж (VNA); зміна їх амплітудно-частотної характеристики є основним методом сенсингу [9], [10].

- Фазова характеристика – дає додаткову інформацію про втрати та швидкість зміни середовища [6].

- Радіочастотне зчитування – для IoT: резонансні піки кодують параметри або ідентифікаційні дані [12].

Мікрохвильові метаматеріальні сенсори використовують зміни електромагнітних властивостей середовища для перетворення фізичних або хімічних параметрів у зміну резонансної відповіді. Основні інформативні параметри: зсув резонансної частоти, зміна добротності та зміна амплітуди. Завдяки цим механізмам такі сенсори є високочутливими, пасивними та придатними для масового використання у телекомунікаційних і IoT-системах.

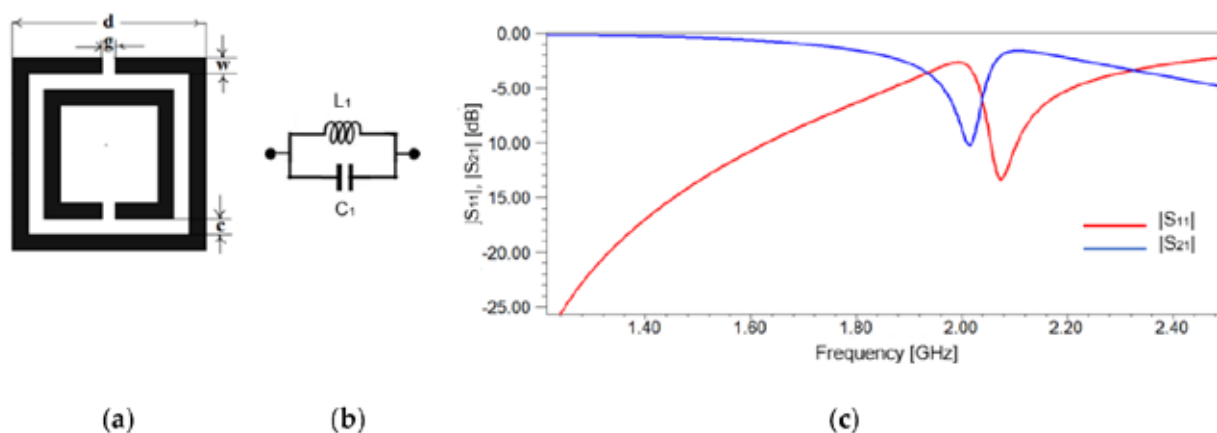


Рис. 6. SRR із вертикальними смужками, еквівалентна LC-схема, частотна характеристика ( $S_{21}$ , амплітуда та резонанси)



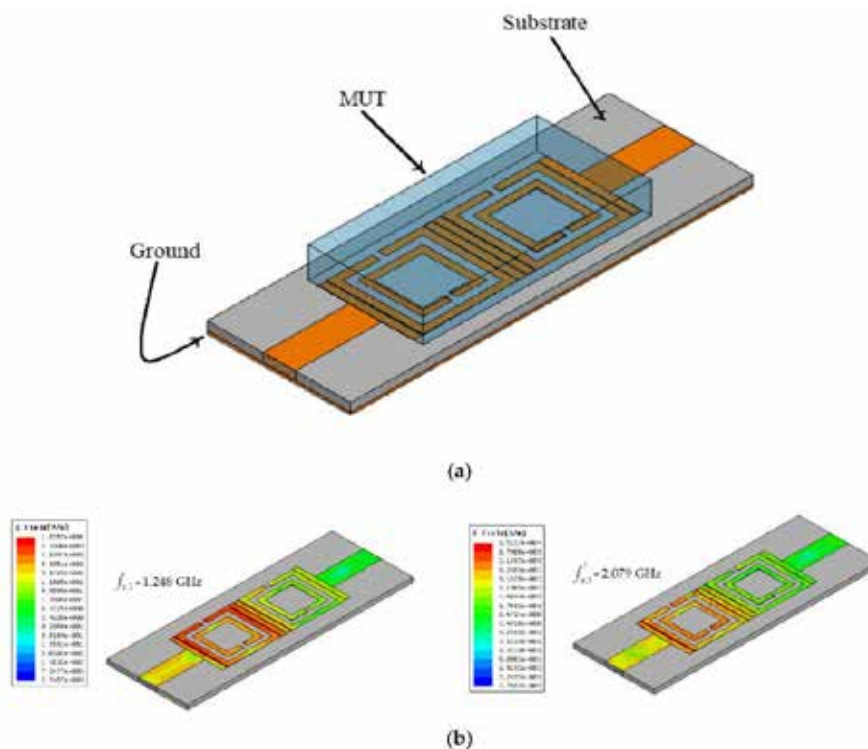


Рис. 7. Вид SRR + демонстрація спектральної відповіді при різному матеріалі підкладки (MUT)

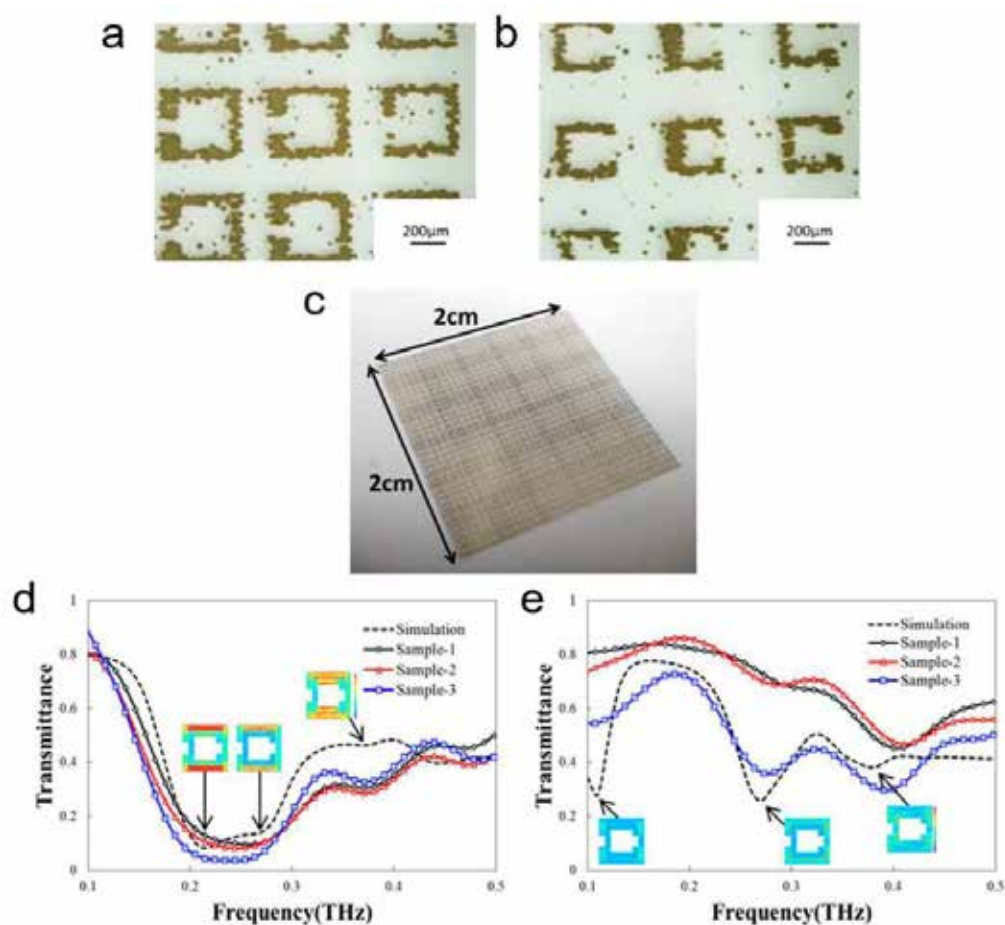


Рис. 8. Метаповерхня + графіки / спектральні відповіді для різних зразків газу чи хімічних речовин

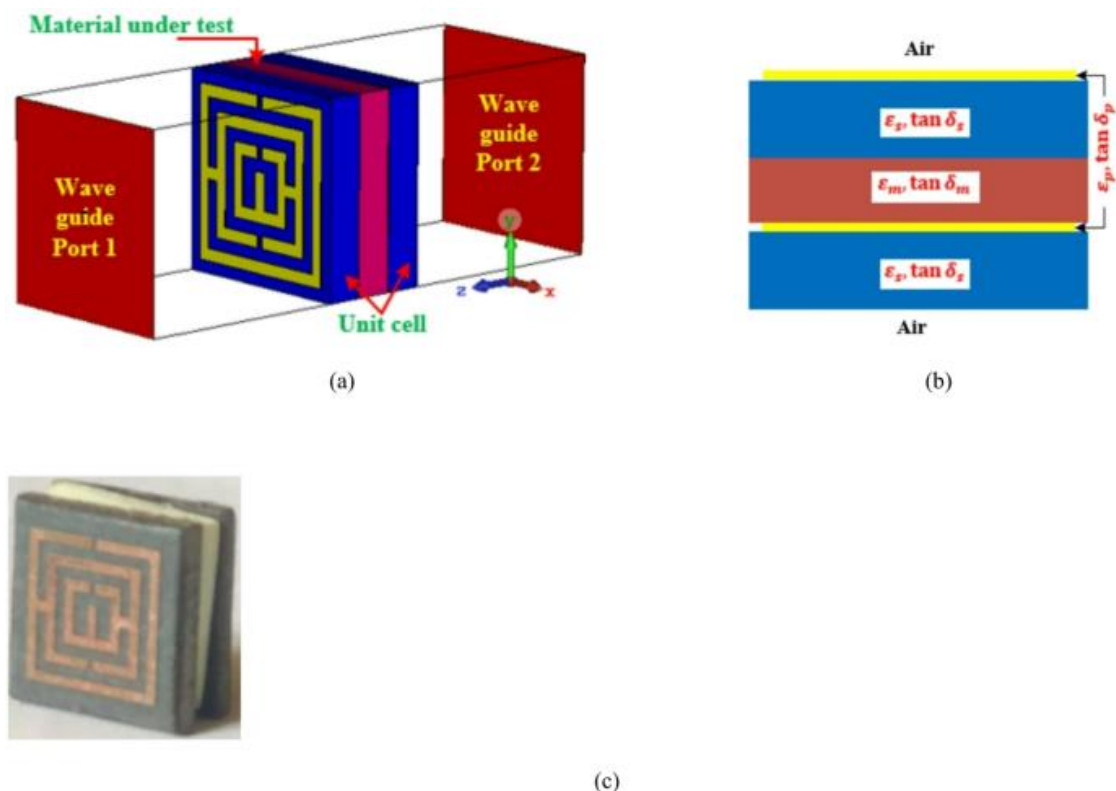


Рис. 9. Одиниця метатомірна комірка, декілька резонансних частот, вплив матеріалу підкладки

### Резонанс Фано та його варіанти – ЕП та ефект Парселла

Одним із найважливіших фізичних механізмів, що забезпечують високу чутливість метаматеріальних сенсорів, є резонанс Фано [13], [14]. Цей ефект проявляється в системах, де взаємодіють широкосмуговий (світлий) та вузькосмуговий (темний) резонансні стани. Інтерференція між ними призводить до утворення асиметричного резонансного профілю – на відміну від звичайного симетричного Лоренцового резонансу.

#### 1. Фізика резонансу Фано

Резонанс Фано вперше описав Уго Фано (U. Fano) у 1961 році для квантових систем, але пізніше цей ефект був виявлений і в електромагнітних структурах – зокрема, у метаматеріалах [15]. У мікрохвильових сенсорах він виникає тоді, коли енергія хвилі одночасно збуджує: широкосмуговий резонатор (наприклад, кільце або смугу), і вузький локалізований мод (наприклад, щільну або паразитну комірку). В результаті формується інтерференційна картина – різкий «пік і провал» у спектрі коефіцієнта відбиття  $|S_{11}|$  або передавання  $|S_{21}|$ . Такі особливості надзвичайно чутливі до навіть незначних змін діелектричних властивостей середовища, що робить

Фано-резонанс ідеальним механізмом для сенсорики [14].

Переваги Фано-резонансних сенсорів:

- надвисока чутливість до зміни показника заломлення;
- можливість мультичастотного сенсингу;
- вузька лінія резонансу  $\rightarrow$  велика добротність;
- висока роздільна здатність при бездротовому зчитуванні [14], [10].

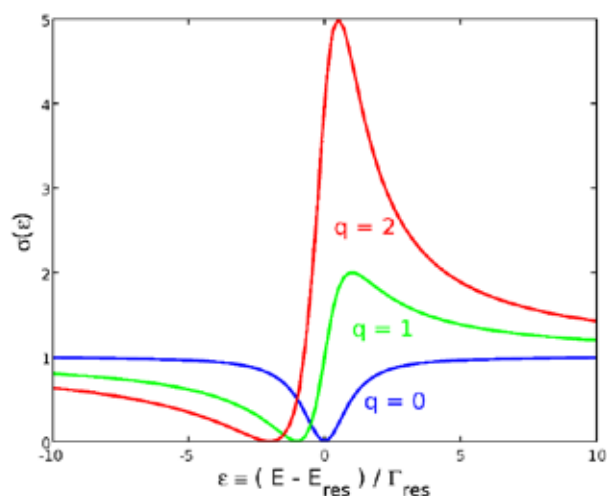


Рис. 10. Схематичне пояснення резонансу Фано

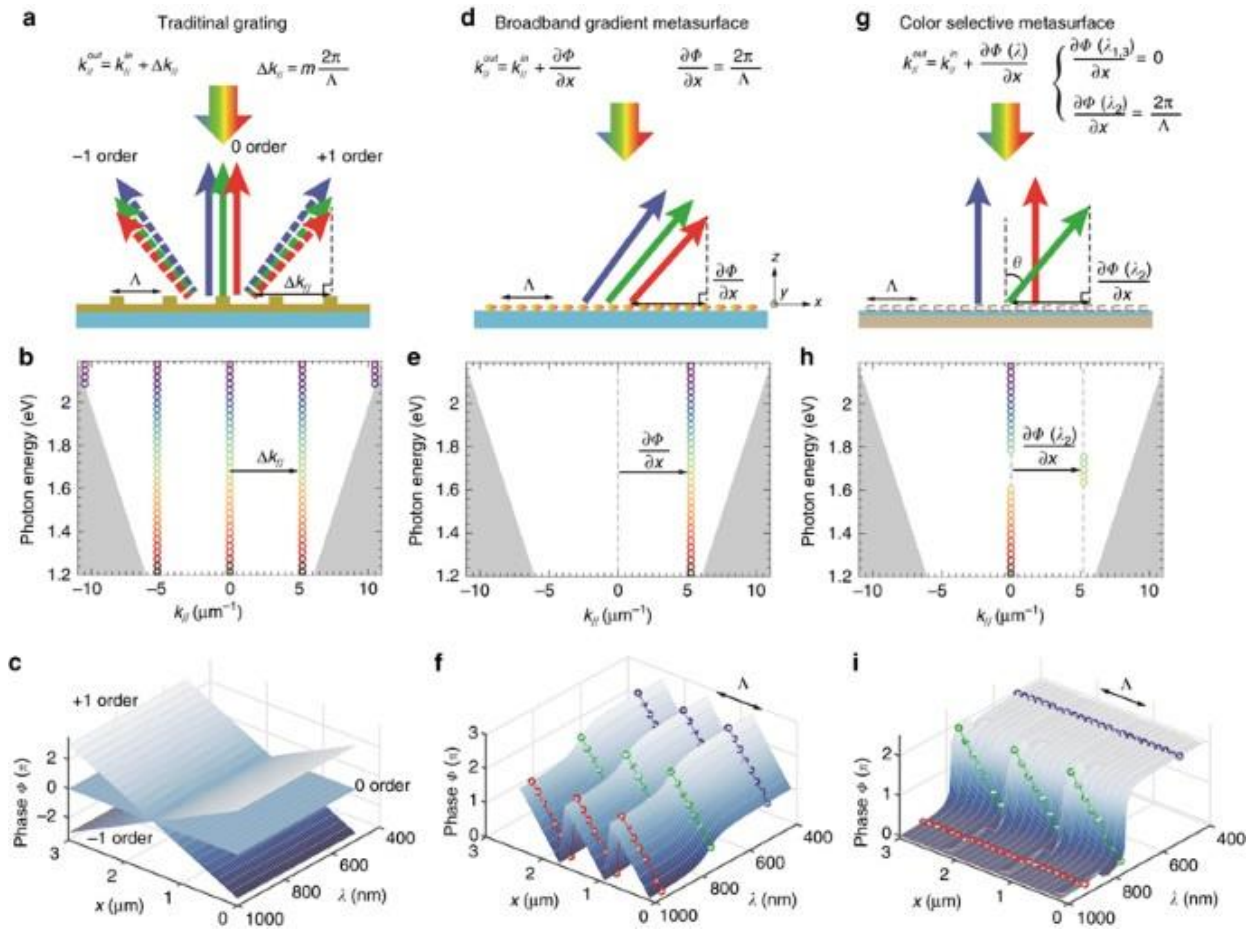


Рис. 11. Реалізація Фано-резонансу в метаматеріалі

## 2. Електромагнітно індукована прозорість (ЕІТ)

ЕІП (electromagnetically induced transparency) – це класичний аналог квантового ефекту, що виникає при взаємодії двох зв'язаних резонаторів (світлого та темного) [16], [17]. Його можна розглядати як окремий випадок резонансу Фано, коли інтерференція настільки сильна, що утворюється вузьке «вікно прозорості» в межах ширшої області поглинання.

У контексті метаматеріальних сенсорів ЕІП-структури дозволяють:

- отримати надвисоку добротність ( $Q > 1000$ ) [16],
- реалізувати точне відстеження зсувів резонансної частоти,
- зменшити вплив втрат і шумів, що особливо важливо для бездротових вимірювань.

Приклад:

Два з'єднані SRR-резонатори – один збуджується зовнішнім полем (світлий), інший – лише через зв'язок (темний) [17]. Коли їх частоти збігаються, у спектрі з'являється вузька «прозора»

смуга – сигнал проходить без втрат. Навіть мінімальна зміна середовища (волога, температура, біомолекули) зміщує цей вузький резонанс, що легко виявляється при зчитуванні.

## 3. Ефект Парсела

Ефект Парсела (Purcell effect) пов'язаний зі зміною швидкості спонтанного випромінювання частинки або диполя, розміщеного в резонаторі [18]. Його відкрив Едвард Парсел у 1946 році. У метаматеріальних сенсорах цей ефект інтерпретується як підсилення локального електромагнітного поля всередині резонансної структури, що безпосередньо підвищує чутливість системи. Фактор Парсела визначається як:

$$Fp = \frac{3}{4\pi^2} \left( \frac{\lambda}{n} \right)^3 \frac{Q}{V}$$

де:

$Q$  – добротність резонатора,

$V$  – об'єм моди (зона локалізації поля),

$\lambda/n$  – ефективна довжина хвилі в середовищі.

Чим менше об'єм  $V$  і більше  $Q$ , тим сильніше підсилення. Таким чином, сенсор з високою



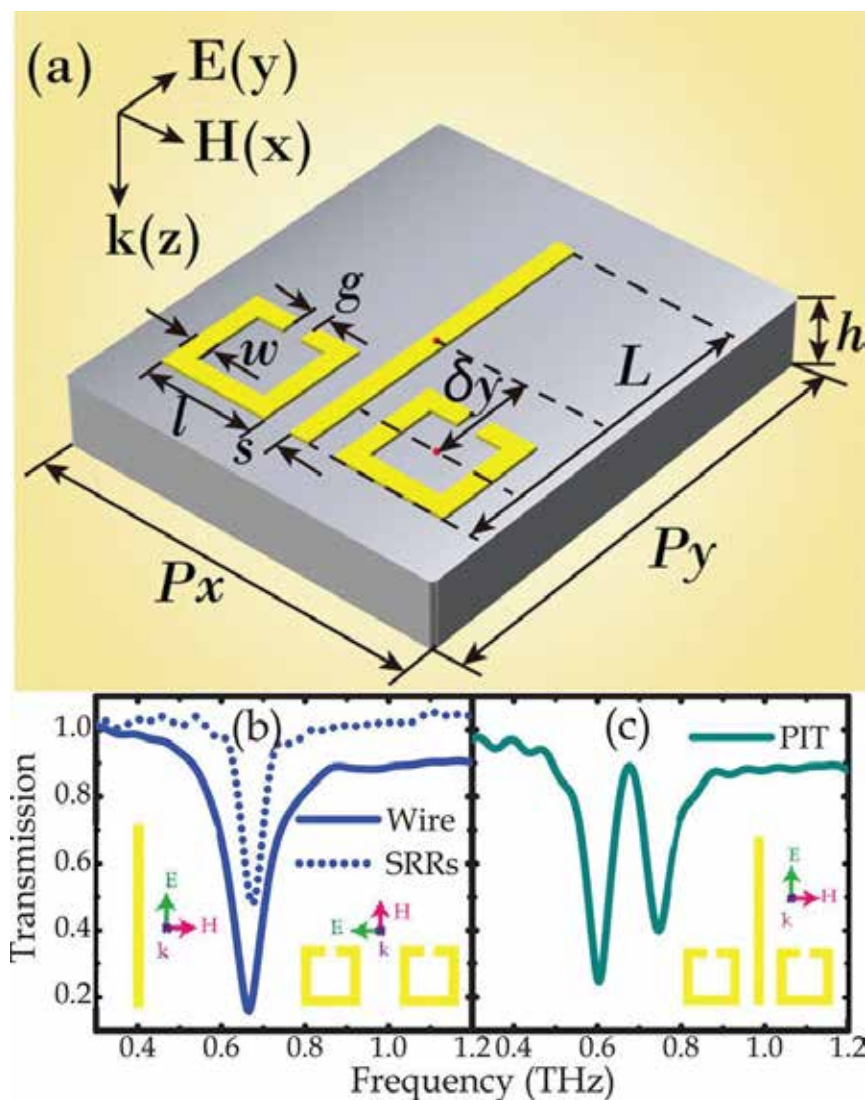


Рис. 12. Електромагнітно індукована прозорість (EIT)

добротністю та щільною локалізацією поля здатен реєструвати надзвичайно малі зміни властивостей середовища [19].

#### 4. Порівняння ефектів

| Ефект   | Фізична природа                       | Основна особливість                           | Застосування в сенсорах                       |
|---------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Фано    | Інтерференція широкої та вузької мод  | Асиметричний резонанс, висока чутливість      | Сенсори показника заломлення, газу, вологості |
| ЕІТ     | Класичний аналог квантової прозорості | Вузьке «вікно» прозорості, висока добротність | Прецизійні сенсори для IoT                    |
| Парсела | Підсилення локального випромінювання  | Посилення сигналу в резонаторі                | Підвищення чутливості, біосенсори             |

#### 5. Роль інтерференційних ефектів у підвищенні чутливості сенсорів

Інтерференційні ефекти, такі як резонанс Фано, електромагнітно індукована прозорість (ЕІП) та ефект Парсела, суттєво підвищують ефективність метаматеріальних сенсорів. Фано-резонанс забезпечує асиметричну форму спектра, де навіть мінімальні зміни навколишнього середовища спричиняють помітний зсув резонансної частоти. ЕІП-структури дозволяють реалізувати вузьке «вікно прозорості» з високою добротністю, що збільшує роздільну здатність вимірювань. Ефект Парсела, у свою чергу, підсилює локальне електромагнітне поле та покращує взаємодію сенсорної структури з досліджуваним середовищем.

Комбінація цих трьох механізмів створює базу для високочутливих, енергоефективних і мініатюрних мікрохвильових сенсорів, придатних для застосування в системах Інтернету речей (IoT),

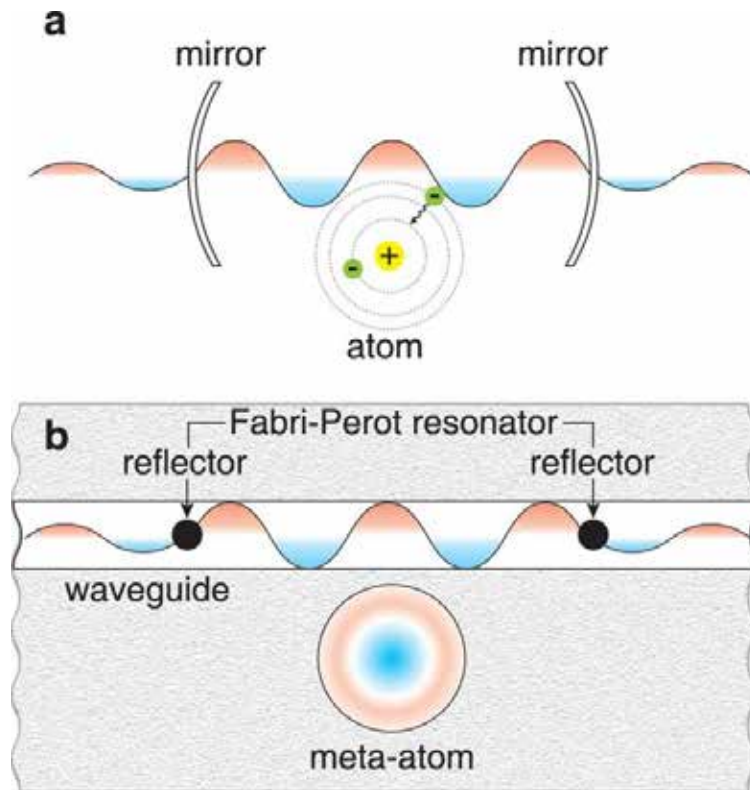


Рис. 13. Ефект Парсела

біомоніторингу та телекомунікаційних платформах 6G.

Отже, резонанс Фано та його варіанти – ЕП і ефект Парсела – формують фізичну основу високочутливих метаматеріальних сенсорів. Вони забезпечують інтерференційне посилення, локалізацію поля та зменшення втрат, що дозволяє досягти високої роздільної здатності навіть при мінімальних змінах середовища. Саме ці ефекти є ключем до розвитку нового покоління мікрохвильових і оптичних сенсорів для Інтернету речей та телекомунікацій.

#### Мостові схеми побудови сенсорів

Мостові вимірювальні схеми є одним із найефективніших способів реєстрації малих змін електромагнітних параметрів у мікрохвильових сенсорах [20], [21]. Вони дозволяють порівнювати сигнал двох або більше гілок, забезпечуючи високу чутливість, компенсацію шумів та стабільність вимірювання в реальному часі. У комбінації з резонансними елементами метаматеріалів такі схеми забезпечують точне визначення зсуву резонансної частоти, зміни амплітуди, добротності та фазових характеристик [22].

#### 1. Принцип роботи мостової вимірювальної схеми

Класичний міст складається з чотирьох гілок, сигнал на яких порівнюється. Баланс мосту дося-

гається тоді, коли різниця сигналів між плечима приблизно дорівнює нулю.

Мікрохвильовий сенсор на метаматеріальній основі в такій схемі вводиться в одну з гілок (активну), а еталонний резонатор – у іншу (компенсаційну).

Чому міст такий чутливий?

- У точці балансу навіть дуже малий зсув резонансної частоти викликає істотну зміну амплітуди або фази вихідного сигналу.

- Це дозволяє детектувати зміни порядку  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  у діелектричній проникності досліджуваного середовища.

- Міст автоматично компенсує флуктуації джерела сигналу, нестабільність генератора та температурні зміни.

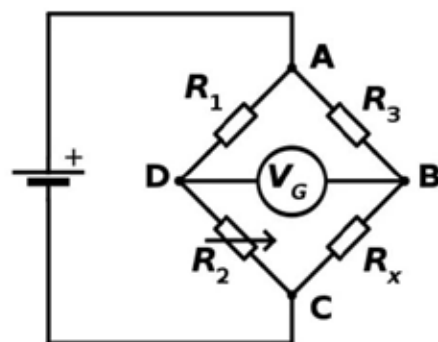


Рис. 14. Мостова схема

## 2. Мостові схеми з метаматеріальними резонаторами

У мікрохвильових сенсорах мостова схема, як правило, реалізується за допомогою:

- двох ідентичних резонаторів на основі SRR/CSRR (один – сенсорний, інший – еталон) [10], [23],
- або одного резонатора і однієї узгодженої лінії передачі,
- або двох гілок метаповерхні з різною чутливістю.

При зміні середовища (вологість, газ, біопро-теїн, механічне напруження):

- резонанс у сенсорному елементі зміщується;
- резонанс в еталонному залишається незмінним;
- це створює розбаланс мосту, який фіксується вимірювальною апаратурою [24].

Такі схеми суттєво підвищують точність і роздільну здатність, оскільки зміна реєструється не за абсолютним значенням параметра, а за різницею між двома гілками, що знижує вплив шумів та дрейфу.

## 3. Поєднання мостових схем із резонансом Фано

Резонанс Фано формує асиметричну частотну характеристику, надзвичайно чутливу до зміни властивостей середовища [14], [25].

Коли Фано-резонатор стає частиною мостової схеми, виникає подвійний ефект посилення чутливості:

1. Інтерференційна асиметрія (вузький + широкий резонанс) підсилює реакцію на зовнішні зміни.

2. Баланс мосту переводить систему в режим, де навіть мінімальна зміна амплітуди/фази дає потужний вихідний сигнал.

Загальний результат:

1. зміна резонансної частоти стає більш вираженою,
2. асиметрія Фано-профілю підкреслюється,
3. точність сенсора зростає до рівня високо-чутливих лабораторних систем,
4. а конструкція залишається компактною та придатною для IoT.

## 4. Переваги мостових схем у мікрохвильових сенсорах

Технічні переваги:

- Надвисока чутливість (до 10–100 разів вище, ніж без моста) [26].
- Добра стійкість до шумів та температурних флуктуацій.

- Можливість безперервного моніторингу.
- Легке узгодження з бездротовими передавачами IoT.

- Можливість інженерного налаштування (змінне співвідношення плечей).

Функціональні переваги:

- Частотні, фазові та амплітудні вимірювання в одному модулі.

- Висока точність при низькому енергоспоживанні.

- Підтримка мультирезонансних структур (SRR, CSRR, EIT-комірки, Фано-метаповерхні).

## 5. Типові застосування мостових мікрохвильових сенсорів

- Вимірювання вологості матеріалів (будівельні, текстиль, ґрунт).

- Газові сенсори (виявлення CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, летких органічних сполук).

- Біосенсори (виявлення білків, глюкози, вірусних маркерів).

- Сенсори напруження та деформації (композитні матеріали, 3D-структури).

- IoT-платформи моніторингу середовища (розумне місто, агротех).

## Проектування та практична реалізація

У цьому розділі наведемо кілька прикладів мікрохвильових сенсорних та резонансних елементів, які були нами розроблені та експериментально досліджені в попередніх роботах. Частина цих структур уже опублікована у відкритих наукових виданнях та патентних описах. Кожна з конструкцій демонструє характерні резонансні ефекти – зокрема електромагнітно індуковану прозорість (EIT) [27] та асиметричний резонанс Фано, що дозволяє суттєво підвищити чутливість і селективність сенсорних пристроїв. У подальших підпунктах наведено короткий опис геометрії, принципу роботи та основні експериментальні характеристики для однієї або кількох таких структур. Для однієї з конструкцій також продемонстровано результати моделювання, виконаного за допомогою власних програмних засобів, а також порівняння з експериментальними даними.

У одній роботі була запропонована цікава й доволі незвична комбінація двох різних типів резонаторів [27], [29]. Було взято звичайний мікросмушковий кільцевий резонатор – компактний, плоский, простий у виготовленні. А поруч розміщено циліндричний об'ємний діелектричний резонатор із дуже високим Q-фактором. Зазвичай такі елементи не поєднують, але саме взаємодія їхніх мод дала нам змогу отримати ефекти EIT та Фано у мікрохвильовому діапазоні.

Ідея проста:

Мікросмушковий кільцевий резонатор сам по собі має відносно широкую резонансну криву, тоді як діелектричний резонатор дає дуже вузький пік. Коли ці два елементи змушені працювати на близьких частотах, їхні моди починають «перемовлятися» – і спектр перетворюється на класичний профіль ЕІТ: між двома провалами виникає вузьке «вікно прозорості», де передача раптово зростає. У іншій конфігурації було отримано асиметричний резонанс Фано, коли широка і вузька мода накладаються так, що утворюється різкий спад і хвіст – тобто характерний викривлений профіль.

У роботі показано, що:

- діелектричний резонатор працює на частоті  $\sim 5.14$  ГГц і має дуже високий  $Q$  (понад 2000),
- мікросмушковий кільцевий резонатор має другу гармоніку, яка якраз і взаємодіє з модою об'ємного резонатора,
- коли вони включені разом, спектр  $S_{21}$  змінюється дуже радикально:
  - о з'являється глибока вузька режекторна смуга (Фано),
  - о або чітке вікно прозорості між двома провалами (ЕІТ).

Фактично, було продемонстровано, що можна створювати малогабаритні високоселективні фільтри та сенсори, керуючи лише простим взаємним розташуванням двох резонаторів [14], [22]. Такі структури чудово працюють і як елементи сенсорів (оскільки високий  $Q$  підсилює чутливість), і як будівельні блоки для метаматеріальних фільтрів. Побудовані експериментальні прото-

типи показали хорошу відповідність із симуляціями, а ефекти ЕІТ та Фано спостерігалися дуже стабільно, що дозволяє застосовувати такі структури в практичних сенсорних і телекомунікаційних системах.

Друга робота присвячена створенню мікросмушкового режекторного фільтра, який базується на комірці метаматеріалу з вираженими властивостями глибокого загасання у вузькій смузі частот, аналогічний схожого типу фільтрам [30-32].

Мікросмушковий режекторний фільтр (фіг. 16) містить основну лінію передачі, що виконує функцію передавання електромагнітного сигналу, по обидва боки від лінії передачі та паралельно їй розташовано короткий півхвильовий резонатор із заклепками для створення короткого замикання та короткий півхвильовий резонатор. При цьому лінія передачі та обидва резонатори розташовані на діелектричній підкладці, що служить основою конструкції. Також, резонатор із заклепками та другий резонатор електромагнітно зв'язані з лінією передачі 1 та не зв'язані між собою.

У конструкції застосовано модифіковану комірку, геометрія якої підібрана так, щоб забезпечити глибокий режекторний режим без помітного впливу на сусідні частоти та без збільшення габаритів фільтра. Результати моделювання характеристик режекторного фільтра представлені на фіг. 17.

Окремо підкреслимо, що подібні елементи можуть застосовуватися як у режимі фільтрів, так і в режимі сенсорних комірок, оскільки зміни діелектричних властивостей навколишнього середовища впливають на резонансну частоту та глибину “провалу”.

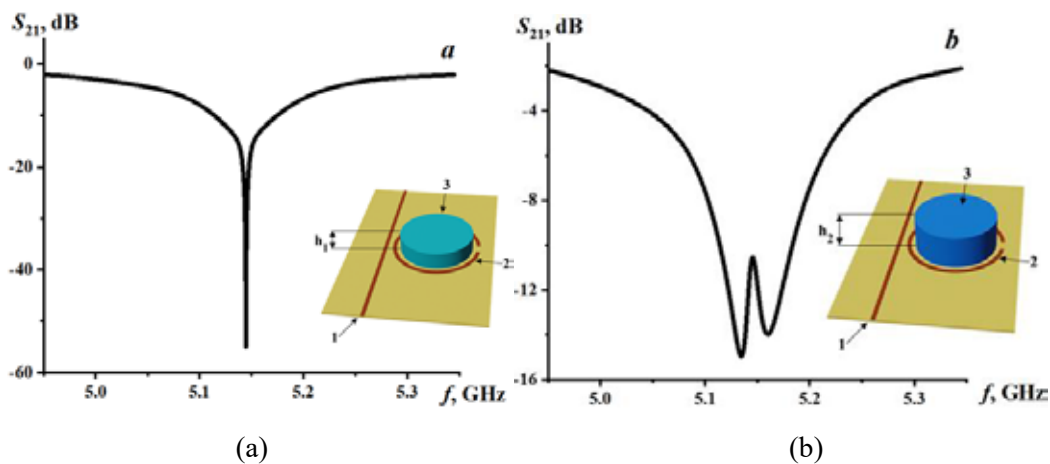


Рис. 15. Спектри передачі заявленого бар'єрного фільтра при реалізації резонансу Фано (а) та бар'єрного фільтра з індукованим вікном прозорості (б). На вставках зображено вигляд заявленого фільтра, що містить лінію передачі (1), мікросмушковий резонатор (2) та тривимірний циліндричний діелектричний резонатор (3) з висотою  $h_1$  (а) та  $h_2$  (б)

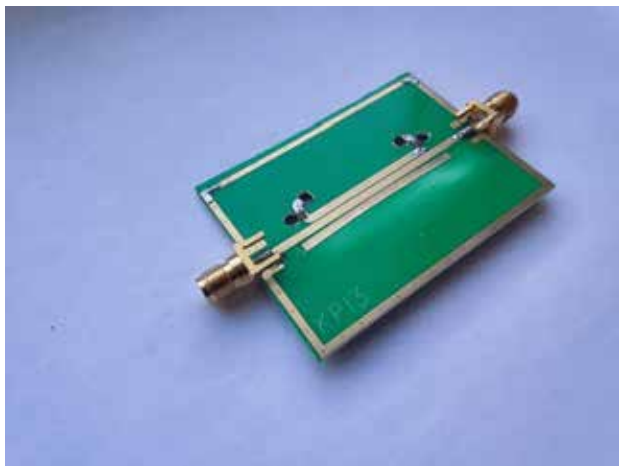


Рис. 16. Фото мікросмужкового режекторного фільтра

Такі структури є перспективними для малогабаритних телекомунікаційних пристроїв, адаптивних фільтрів і мікрохвильових сенсорів.

**Висновки.** Мікрохвильові сенсори на основі метаматеріальних комірок демонструють унікальні властивості, що вирізняють їх серед традиційних резонансних структур і роблять перспективними для сучасних телекомунікаційних систем та технологій Інтернету речей (IoT). Їхня поява стала можливою завдяки розвитку метаматеріалів на початку 2000-х років, коли було показано, що штучно створені резонансні елементи

можуть формувати електромагнітні характеристики, недосяжні в природних матеріалах.

У статті було розглянуто основні типи метаматеріальних сенсорів – SRR/CSRR-структури, комбіновані та гібридні резонатори, а також 3D-діелектричні елементи. Показано, що чутливість таких систем зумовлена значною локалізацією електромагнітного поля та залежністю резонансних характеристик від навколишнього середовища. Метаматеріальні сенсори дозволяють фіксувати зсув резонансної частоти, зміну добротності та амплітуди, що робить їх придатними для контролю вологості, деформацій, концентрації газів, біологічних зразків та інших фізико-хімічних параметрів.

Особливу увагу приділено інтерференційним ефектам, таким як резонанс Фано, електромагнітно індукованій прозорості (EIT) та ефекту Парселла. Ці явища забезпечують формування вузьких, асиметричних та надзвичайно чутливих спектральних особливостей, які значно підвищують роздільну здатність сенсорів. Додаткове застосування мостових схем дозволяє ще сильніше підсилити ці ефекти, розширити динамічний діапазон і підвищити точність вимірювань у реальному часі.

У практичній частині наведено приклади двох власних експериментальних конструкцій, розроблених авторами. Перша структура – моди-

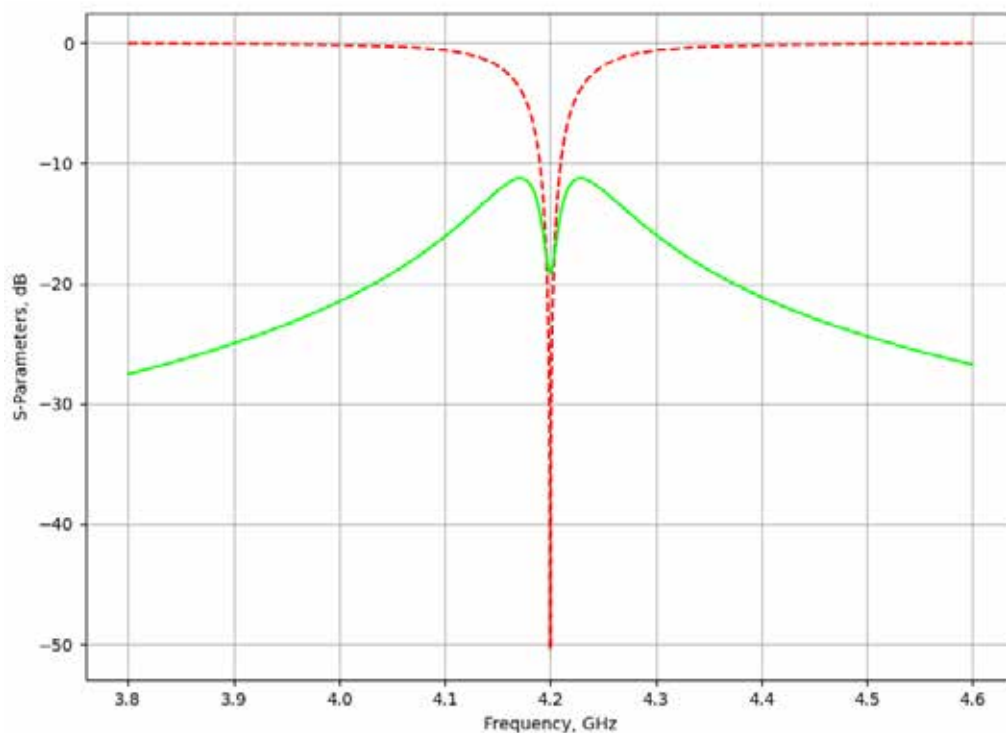


Рис. 17. Результати моделювання характеристик режекторного фільтра, S11 – зелена крива, S21 – червона



фікований SRR-резонатор з ЕІТ-вікном – демонструє керовану інтерференційну взаємодію кількох резонансних мод і формування “прозорості” в діапазоні СВЧ. Друга конструкція – мікросмужковий режекторний фільтр на основі метаматеріальної комірки – забезпечує глибоке локальне загасання з високою добротністю. Показано як експериментальні, так і розрахункові характеристики, що підтверджують можливість точного налаштування резонансної частоти та форми спектра.

Сукупно отримані результати підтверджують, що метаматеріальні сенсори є надзвичайно перспективною платформою для нових поколінь телекомунікаційних систем та IoT-пристроїв. Їх компактність, висока чутливість, можливість інтеграції в друковані плати та адаптації під масове виробництво роблять такі структури природним вибором для майбутніх мереж 5G/6G, систем моніторингу довкілля, біомедичних сенсорів та “розумної” інфраструктури.

Метаматеріальні комірки дозволяють створювати сенсорні системи нового класу – мінімальні за розмірами, але максимальні за функціональністю, що є ключовим фактором у розвитку IoT та телекомунікацій наступного покоління.

Метаматеріальні мікрохвильові сенсори мають ключове значення для розвитку сучасних телекомунікацій та Інтернету речей (IoT).

Їхня компактність і можливість інтеграції в друковані плати дозволяють розміщувати сен-

сорні модулі безпосередньо в елементах телекомунікаційного обладнання – антенах, фільтрах, малопотужних передавачах, модулях 5G/6G та пристроях ближнього радіозв'язку (NFC, RFID, Wi-Fi HaLow).

Висока чутливість до локальних змін параметрів середовища забезпечує нові можливості для безперервного моніторингу параметрів конструкцій, компонентів мережі, віддалених об'єктів, біологічних та технічних систем.

Метаматеріальні резонатори здатні працювати як пасивні сенсорні вузли, що не потребують живлення, або як частина енергоефективних телеметричних модулів.

Завдяки інтерференційним ефектам (Фано, ЕІТ), вони забезпечують вузькі спектральні особливості, які критично важливі для високоточних систем: від адаптивних фільтрів до вузлів вимірювання параметрів сигналів у мережах надвисокої щільності. Таким чином, метаматеріальні сенсори не лише розширюють традиційні можливості СВЧ-технологій, але й формують фундамент для майбутніх архітектур IoT і телекомунікацій наступного покоління.

**Подяка.** Робота проведена при підтримці Swedish Foundation for Strategic Research within the framework of SSF Project “Electromagnetic metamaterials for communications and sensing” (ID UKR24 0008) та NATO project SPS G6002 – «3D Metamaterials for Energy Harvesting and Electromagnetic Sensing».

#### Список літератури:

1. Pendry J. B. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 85, No. 18. P. 3966. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3966>
2. Smith D. R., Pendry J. B., Wiltshire M. C. K. Metamaterials and negative refractive index. *Science*. 2004. Vol. 305, No. 5685. P. 788–792. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1096796>
3. Shelby R. A., Smith D. R., Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*. 2001. Vol. 292, No. 5514. P. 77–79. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1058847>
4. Schurig D., Mock J. J., Justice B. J., Cummer S. A., Pendry J. B., Starr A. F., Smith D. R. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*. 2006. Vol. 314, No. 5801. P. 977–980. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1133628>
5. Vena A., Sydänheimo L., Tentzeris M. M., Ukkonen L. A fully inkjet-printed wireless and chipless sensor for CO<sub>2</sub> and temperature detection. *IEEE Sensors Journal*. 2015. Vol. 15, No. 1. P. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2341263>
6. Hu J., Zhang H., Di B., Bian K., Song L. Meta-material Sensors based Internet of Things for 6G Communications. *arXiv preprint*. 2021. arXiv:2107.01432.
7. Chen H.-T., Taylor A. J., Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications. *Reports on Progress in Physics*. 2016. Vol. 79, No. 7. 076401. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/7/076401>
8. Ni B., Wang Z., Zhao R. et al. Humidity sensor based on perfect metamaterial absorber. *Proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices*. 2016.
9. Dong L., Wang L., Huang Q. Applying metamaterial-based repeater in LC passive wireless sensors to enhance readout. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18, No. 5. P. 1755–1760. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2787748>

10. Al-Gburi A. J., Hashim U., Mahdi M. A. Multiband metamaterial-based sensors: A review. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 5. P. 1845. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22051845>
11. Shafique M. F., Rehman M. Z. U., Malik A. Flexible metamaterial strain sensor for structural health monitoring. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 8. P. 2288. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20082288>
12. Lee H., Lim S., Park S. Metamaterial biosensors for detection of biomolecules: A review. *Biosensors*. 2022. Vol. 12, No. 6. P. 633. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios12060633>
13. Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts. *Physical Review*. 1961. Vol. 124, No. 6. P. 1866–1878. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.1866>
14. Luk'yanchuk B., Zheludev N. I., Maier S. A. et al. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials. *Nature Materials*. 2010. Vol. 9. P. 707–715. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat2810>
15. Hao F., Sonnefraud Y., Van Dorpe P., Maier S. A. Strong interaction between localized plasmon resonances and surface plasmon polaritons. *Nano Letters*. 2011. Vol. 11, No. 2. P. 737–742. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl103266y>
16. Zhang S., Genov D. A., Wang Y., Liu M., Zhang X. Plasmon-induced transparency in metamaterials. *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 101, No. 4. 047401. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.047401>
17. Tassin P., Zhang L., Koschny T., Economou E. N., Soukoulis C. M. Planar designs for electromagnetically induced transparency in metamaterials. *Optics Express*. 2012. Vol. 20, No. 22. P. 24571–24583. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.20.024571>
18. Purcell E. M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies. *Physical Review*. 1946. Vol. 69. P. 681. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.69.681>
19. Pelton M. Modified spontaneous emission in nanophotonic structures. *Nature Photonics*. 2015. Vol. 9. P. 427–435. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.103>
20. Pozar D. M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 732 p.
21. Collin R. E. *Foundations for Microwave Engineering*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 944 p.
22. Chen T., Li S., Sun H. Metamaterials application in sensing. *Electronics*. 2018. Vol. 7, No. 10. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7100238>
23. Lee H. J., Son H. Microwave resonator sensors for detection of small dielectric changes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015. Vol. 228. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.02.021>
24. Mandal D., Ghosh A., Ghatak R. Differential microwave sensors using resonator pairs. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18, No. 22. P. 9212–9220. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2871364>
25. Liao S., Zhang J., Wang L. et al. High-sensitivity Fano-resonance metamaterial sensors. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40307-0>
26. Reuven R., Kaplan G., Carmon Y. Differential microwave bridge circuits for precision sensing. *Measurement Science and Technology*. 2018. Vol. 29, No. 10. 105104. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aad9e6>
27. Abi-Salloum T. Y. Electromagnetically induced transparency and Autler–Townes splitting: Two similar but distinct phenomena in two categories of three-level atomic systems. *Physical Review A*. 2010. Vol. 81, No. 5. 053836. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.053836>
28. Ilchenko M., Zhivkov A. Bridge equivalent circuits for microwave filters and Fano resonance. In: *Advances in Information and Communication Technologies*. Springer, 2019. P. 278–298.
29. Papasimakis N., Fedotov V. A., Zheludev N. I., Prosvirnin S. L. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency. *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 101, No. 25. 253903. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.253903>
30. М. Е. Ільченко, А. П. Живков, А. Г. Витюк. Режекторный фильтр СВЧ (Режекторний фільтр СВЧ), Авторське свідоцтво № SU1529321A1. Бюл. № 46, 1989.
31. A. Zhivkov, M. Ilchenko, O. Fedorchuk, O. Vyunov, T. Plutenko, A. Belous. Modified Split-Ring Resonator with Electromagnetically Induced Transparency (Модифікований резонатор із розділеним кільцем з електромагнітно індукованою прозорістю), *Research & Development in Material Science*. Published: July 28, 2022.
32. А. Г. Витюк, А. Г. Войтенко, А. П. Живков, М. Е. Ільченко, Т. Н. Наритник, В. И. Приймак. Режекторный СВЧ-фильтр (Режекторний СВЧ-фільтр). Авторське свідоцтво № SU1739408A1. Бюл. № 21, 1992.

## Halytskyi I.I., Zhivkov O.P. MICROWAVE SENSORS BASED ON METAMATERIAL CELLS

*The article discusses modern approaches to the creation of microwave sensors based on metamaterial cells. Due to their unique electromagnetic properties that are not found in natural materials, metamaterials open up new opportunities in the field of highly sensitive sensors. Particular attention is paid to the application of such sensors in the Internet of Things (IoT), telecommunication systems, wireless monitoring and spectroscopy. The paper also highlights the physical principles of sensor construction, types of structures, as well as effects that*



increase sensitivity – in particular, Fano resonance, electromagnetically induced transparency and the Purcell effect. The history of the development of the metamaterial concept and its evolution in the context of sensor applications is presented.

A separate section is devoted to the classification of metamaterial sensors by design features, method of reading information, operating frequency range and nature of interaction with the studied environment. Sensors based on split-ring resonators, electromagnetic absorbers, EIT and Fano structures, as well as multi-resonant and passive wireless sensor systems are considered. The general principles of their operation are analyzed using equivalent LC models and S-matrix parameters.

Considerable attention is paid to the use of interference effects and bridge measurement circuits, which allow to significantly increase the resolution and stability of sensor measurements, reduce the influence of noise and temperature drift. Examples of practical implementation of microwave resonant and sensor structures are given, in which the Fano effects and electromagnetically induced transparency are experimentally demonstrated. It is shown that the proposed approaches are promising for creating compact, energy-efficient and highly sensitive sensors of a new generation for telecommunications and IoT platforms.

**Keywords:** metamaterials, microwave sensors, split-ring resonator (SRR), complementary split-ring resonator (CSRR), interference resonances, Fano resonance, electromagnetically induced transparency (EIT), Purcell effect, microstrip structures, bridge measurement circuits, Internet of Things (IoT), telecommunications, microwave filters, high-sensitivity sensors.

Дата першого надходження статті до видання: 06.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.01.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Гредасов Д.О.**

<https://orcid.org/0009-0000-4994-4879>

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**Яковенко І.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-0963-4347>

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## БАГАТОРІВНЕВА КЛАСТЕРНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У РОЄВИХ MESH-МЕРЕЖАХ ДРОНІВ

У статті розглянуто задачу підвищення енергоефективності роєвих телекомунікаційних систем дронів, що функціонують у MESH-топології, в умовах обмежених енергетичних ресурсів та динамічної зміни структури мережі. Показано, що традиційні однорівневі схеми кластеризації не забезпечують достатньо рівномірного розподілу енергетичного навантаження між вузлами та призводять до передчасного виснаження окремих елементів мережі, що негативно впливає на її час автономного функціонування.

Запропоновано багаторівневу кластерну модель організації роєвої MESH-мережі дронів, яка ґрунтується на ієрархічному розподілі ролей між вузлами та багаторівневій агрегації трафіку. У межах моделі формуються кластери з різними рівнями відповідальності, що дозволяє локалізувати передавання даних, зменшити кількість енергетично затратних ретрансляцій та забезпечити більш раціональне використання енергетичного ресурсу вузлів.

Розроблено математичну та енергетичну моделі, які описують процеси передавання, приймання й агрегації даних у роєвій MESH-мережі з урахуванням навантаження та залишкової енергії дронів. Запропоновано метрики оцінювання ефективності, зокрема час життя мережі та дисперсію залишкової енергії, що дозволяє кількісно оцінити рівномірність енергоспоживання та стійкість мережі до деградації.

Ефективність запропонованого підходу підтверджено шляхом комп'ютерного моделювання та порівняльного аналізу з базовим алгоритмом LEACH. Результати експериментів показали, що багаторівнева кластерна модель забезпечує більш рівномірний розподіл енергетичного навантаження між вузлами та подовження часу життя мережі приблизно на 15 % у широкому діапазоні коефіцієнтів навантаження. Отримані результати підтверджують наукову новизну та практичну доцільність застосування багаторівневої кластеризації у роєвих MESH-мережах дронів.

**Ключові слова:** кластеризація, енергозбереження, роєві дрони, MESH-мережа, час життя мережі.

**Постановка проблеми.** У сучасних телекомунікаційних системах роєві мережі безпілотних літальних апаратів набувають все більшого поширення як основа для побудови мобільних MESH-інфраструктур із швидкою самоорганізацією та відсутністю фіксованих елементів керування. Такі мережі знаходять застосування у задачах моніторингу, аварійно-рятувальних операцій, тимчасового розгортання каналів зв'язку та у військових системах, де надійність і автономність функціонування мають вирішальне значення. Водночас

обмежені енергетичні ресурси дронів і динамічна зміна топології істотно ускладнюють забезпечення стабільного передавання даних упродовж тривалого часу.

Однією з ключових проблем роєвих MESH-мереж є нерівномірний розподіл енергетичного навантаження між вузлами, що призводить до передчасного виходу з ладу окремих елементів і деградації зв'язності мережі. Традиційні підходи до кластеризації, зокрема однорівневі алгоритми типу LEACH, не повною мірою враховують дина-

міку топології та зміну ролей вузлів у процесі маршрутизації, що обмежує їхню ефективність у мобільних середовищах. Це зумовлює необхідність розроблення нових моделей організації мережі, орієнтованих на підвищення енергоефективності та стійкості функціонування.

У зв'язку з цим у статті запропоновано багаторівневу кластерну модель енергозбереження для роєвих MESH-мереж дронів, яка базується на ієрархічній організації вузлів та оптимізації процесів агрегації і передавання даних. Модель формалізує енергетичні витрати з урахуванням просторових характеристик і ролі вузлів у мережі та дозволяє кількісно оцінити вплив кластеризації на час життя мережі. Ефективність запропонованого підходу підтверджено шляхом комп'ютерного моделювання, результати якого демонструють зменшення енергетичного навантаження та збільшення тривалості автономного функціонування мережі.

Стрімкий розвиток роєвих безпілотних систем і зростання вимог до автономності їх функціонування зумовлюють підвищену увагу до питань енергоефективності телекомунікаційних MESH-мереж. У практичних сценаріях використання дронів, зокрема під час моніторингу великих територій, надзвичайних ситуацій або у зонах з відсутньою стаціонарною інфраструктурою, можливість тривалого підтримання зв'язку без підзарядки є критичним фактором. Обмежені енергетичні ресурси вузлів у поєднанні з динамічною зміною топології роблять традиційні підходи до організації мережі недостатньо ефективними.

Актуальність дослідження також зумовлена обмеженнями існуючих алгоритмів кластеризації, які переважно орієнтовані на статичні або слабо мобільні сенсорні мережі. У роєвих MESH-мережах дронів такі підходи не забезпечують належного балансування навантаження, оскільки не враховують часті зміни ролей вузлів, варіативність відстаней між ними та нерівномірність трафіку. У результаті окремі дрони швидко вичерпують свій енергетичний ресурс, що призводить до втрати зв'язності та зниження загальної ефективності телекомунікаційної системи.

У цьому контексті розроблення багаторівневих моделей кластеризації, здатних адаптуватися до динамічних умов функціонування, є актуальним науковим і прикладним завданням. Такі моделі дозволяють поєднати вимоги енергозбереження, стійкості маршрутизації та масштабованості мережі, що є принципово важливим для сучасних телекомунікаційних застосувань. Запропонований

у роботі підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку мобільних мереж і спрямований на подолання існуючих обмежень у галузі енергоефективної організації роєвих MESH-мереж дронів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) зумовив виділення окремого класу телекомунікаційних мереж – FANET (Flying Ad-hoc Networks). У сучасних міжнародних дослідженнях [1, 2] зазначається, що ключовою проблемою таких мереж є висока динаміка топології, яка у поєднанні з обмеженим зарядом батарей дронів вимагає розроблення специфічних протоколів маршрутизації. Автори огляду [3] підкреслюють, що традиційні протоколи для наземних мобільних мереж (MANET) не забезпечують необхідної енергоефективності у тривимірному просторі з високими швидкостями переміщення вузлів.

Одним із найбільш ефективних методів зниження енерговитрат визнано кластеризацію мережі. У класичних роботах [4] було запропоновано алгоритм LEACH, який став базовим для багатьох досліджень, як зауважують він розроблений для стаціонарних сенсорних мереж і втрачає ефективність при частій зміні топології рою. Сучасні європейські дослідження [5] пропонують модифікації кластерних підходів із використанням нечіткої логіки та евристичних алгоритмів для вибору голови кластера (Cluster Head), однак ці методи часто вимагають значних обчислювальних ресурсів безпосередньо на борту дрона.

Українська наукова школа робить вагомий внесок у розвиток методів керування трафіком та енергоресурсами у спеціальних мережах. озроблено тензорні та потокові моделі маршрутизації [6], які дозволяють оптимізувати розподіл навантаження та підвищити стійкість мережі. Дослідження [7] фокусується на проблемах керування трафіком в умовах обмежених ресурсів пропускної здатності, що є характерним для MESH-мереж.

Питання енергоефективності у контексті якості обслуговування (QoS) розглядаються у роботах [8, 9]. Автори доводять, що врахування залишкової енергії вузлів при побудові маршруту є критично важливим для подовження часу життя мережі. Водночас у дослідженні [10] акцентується увага на необхідності ієрархічної організації взаємодії у групах БПЛА для зменшення кількості службових повідомлень.

Незважаючи на значну кількість публікацій, проблема створення адаптивної багаторівневої

моделі, яка б поєднувала енергетичне балансування з урахуванням просторової мобільності рою дронів, залишається актуальною. Більшість існуючих рішень або ігнорують багаторівневість [11], або не враховують стохастичну природу MESH-з'єднань [12]. Це обумовлює необхідність розроблення запропонованої у статті моделі.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є розроблення та обґрунтування багаторівневої кластерної моделі енергозбереження у роєвих MESH-мережах дронів, спрямованої на підвищення часу автономного функціонування мережі в умовах динамічної топології та обмежених енергетичних ресурсів. Досягнення поставленої мети передбачає формалізацію процесів передавання й агрегації даних з урахуванням ієрархічної організації вузлів та їх енергетичного стану, а також кількісну оцінку впливу кластеризації на ключові показники ефективності телекомунікаційної системи.

Для реалізації поставленої мети в роботі необхідно розв'язати сукупність взаємопов'язаних наукових задач, що охоплюють теоретичні та прикладні аспекти дослідження. Зокрема, потрібно сформулювати математичний апарат для опису енергетичних витрат у роєвій MESH-мережі з урахуванням просторових характеристик і ролей вузлів, розробити механізм багаторівневої кластеризації та агрегації трафіку, а також визначити інтегральні метрики оцінювання ефективності, насамперед час життя мережі та рівномірність енергоспоживання.

Завершальним етапом дослідження є експериментальна валідація запропонованої моделі шляхом комп'ютерного моделювання у спеціалізованому симуляційному середовищі. У межах цього етапу передбачається порівняльний аналіз запропонованого підходу з базовими алгоритмами кластеризації, дослідження впливу ієрархічної організації мережі на енергетичні характеристики та формулювання узагальнених висновків щодо доцільності використання багаторівневої кластеризації у телекомунікаційних MESH-мережах дронів.

**Виклад основного матеріалу.** *Модель роєвої MESH-мережі дронів.* Роєва телекомунікаційна система дронів розглядається як динамічна бездротова мережа з MESH-топологією, у якій кожен вузол поєднує функції джерела даних, ретранслятора та маршрутизатора. Нехай мережа складається з множини дронів

$$\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}, \quad (1)$$

де  $N$  – загальна кількість вузлів у рої. Кожен дрон  $i \in \mathcal{N}$  характеризується поточними просторовими координатами  $\mathbf{r}_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ , що змінюються у часі внаслідок мобільності рою.

Наявність бездротового каналу зв'язку між двома вузлами  $i$  та  $j$  визначається їх взаємною відстанню

$$d_{ij}(t) = \mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t), \quad (2)$$

де  $\|\cdot\|$  – евклідова норма. Вважається, що прямий канал зв'язку існує тоді і лише тоді, коли  $d_{ij}(t) \leq R$ , де  $R$  – радіус стійкого бездротового з'єднання, зумовлений параметрами радіомодуля та умовами поширення сигналу. Таким чином, топологія MESH-мережі формується як неорієнтований граф  $G(t) = (\mathcal{N}, \mathcal{E}(t))$ , множина ребер якого  $\mathcal{E}(t)$  змінюється у часі.

Енергетичний стан кожного дрона описується залишковою енергією акумулятора  $E_i(t)$ . Початковий енергетичний ресурс усіх вузлів приймається однаковим і дорівнює

$$E_i(0) = E_0, i \in \mathcal{N}, \quad (3)$$

де  $E_0$  – номінальна енергоємність батареї. Подальша еволюція  $E_i(t)$  визначається інтенсивністю комунікаційних операцій та участю вузла у ретрансляції трафіку.

Передавання інформації в роєвій MESH-мережі здійснюється у багатохоповому режимі. Нехай вузол  $i$  передає пакет даних обсягом  $l$  біт до вузла  $j$ . Витрати енергії на передавання можна подати у вигляді

$$E_{ij}^{\text{tx}}(l) = l \cdot (E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}} \cdot d_{ij}^{\alpha}), \quad (4)$$

де  $E_{\text{elec}}$  – енергія, необхідна для роботи електронних схем передавача,  $E_{\text{amp}}$  – коефіцієнт підсилювача сигналу,  $\alpha$  – показник втрат середовища (зазвичай  $2 \leq \alpha \leq 4$ ). Фізичний зміст цього співвідношення полягає у врахуванні як сталих витрат на обробку сигналу, так і зростання енергоспоживання зі збільшенням відстані між вузлами.

Витрати енергії на приймання пакета визначаються простішою залежністю

$$E_i^{\text{rx}}(l) = l \cdot E_{\text{elec}}, \quad (5)$$

оскільки на цьому етапі не задіяний підсилювач потужності. Сукупні витрати енергії вузла  $i$  за інтервал часу  $\Delta t$  можна подати як

$$\Delta E_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i^{\text{tx}}} E_{ij}^{\text{tx}}(l) + \sum_{k \in \mathcal{N}_i^{\text{rx}}} E_i^{\text{rx}}(l), \quad (6)$$

де  $\mathcal{N}_i^{\text{tx}}$  та  $\mathcal{N}_i^{\text{rx}}$  – множини вузлів, яким дрон  $i$  відповідно передає та від яких приймає дані у заданому часовому інтервалі.

У MESH-топології кожен дрон потенційно бере участь у маршрутизації трафіку інших вузлів, що призводить до нерівномірного енергетичного виснаження мережі. Саме ця властивість зумовлює необхідність введення механізмів структуризації мережі. Час життя мережі у подальшому розглядається як момент, коли енергетичний ресурс хоча б одного критично важливого вузла досягає порогового значення

$$T_{\text{life}} = \min_{i \in \mathcal{N}} \{t : E_i(t) \leq E_{\min}\}, \quad (7)$$

де  $E_{\min}$  – мінімальний допустимий рівень енергії, за якого вузол втрачає здатність виконувати комунікаційні функції.

Запропонована модель роєвої MESH-мережі дронів створює формальне підґрунтя для подальшого введення багаторівневої кластеризації. Саме в межах цієї моделі стає можливим кількісно оцінити, яким чином перерозподіл ролей між вузлами та зменшення кількості дальніх ретрансляцій впливають на динаміку  $E_i(t)$  та на час життя мережі в цілому.

*Багаторівнева кластерна модель.* Для зменшення енергетичних витрат, притаманних плоскій MESH-топології, у роботі вводиться багаторівнева кластерна організація роєвої мережі дронів. Основна ідея підходу полягає у формуванні ієрархії вузлів, у межах якої частина дронів тимчасово виконує функції агрегування та маршрутизації трафіку, знімаючи надмірне навантаження з решти мережі. Така організація дозволяє обмежити кількість дальніх ретрансляцій і, відповідно, зменшити сумарні енергетичні витрати.

Нехай множина вузлів  $\mathcal{N}$  розбивається на сукупність первинних кластерів

$$\mathcal{N} = \bigcup_{k=1}^K \mathcal{C}_k, \quad (8)$$

де  $\mathcal{C}_k$  – множина вузлів  $k$ -го первинного кластера, а  $K$  – загальна кількість кластерів. У кожному кластері виділяється кластерна голова першого рівня, яка відповідає за локальну агрегацію трафіку та його подальшу передачу. Множину таких вузлів позначимо як

$$\mathcal{H}_1 = \{h_1^{(1)}, h_2^{(1)}, \dots, h_K^{(1)}\}. \quad (9)$$

Вибір кластерної голови першого рівня здійснюється на основі інтегрального критерію, що враховує залишкову енергію вузла та його просторове положення відносно інших елементів кластера. Для вузла  $i \in \mathcal{C}_k$  вводиться функція доцільності

$$\Phi_i^{(1)} = \omega_E \frac{E_i}{E_0} + \omega_D \left( 1 - \frac{1}{|\mathcal{C}_k|} \sum_{j \in \mathcal{C}_k} \frac{d_{ij}}{R} \right), \quad (10)$$

де  $\omega_E$  та  $\omega_D$  – вагові коефіцієнти, що визначають відносну важливість енергетичного та просторового чинників. Максимізація  $\Phi_i^{(1)}$  забезпечує вибір вузла з достатнім енергетичним запасом і вигідним положенням у кластері, що має чіткий фізичний зміст у контексті мінімізації середньої дальності передавання.

На другому рівні ієрархії формується мережа міжкластерної взаємодії. Кластерні голови першого рівня об'єднуються у вторинні кластери, для яких знову визначаються вузли-агрегатори другого рівня. Множину таких вузлів позначимо  $\mathcal{H}_2 \subseteq \mathcal{H}_1$ . Процес кластеризації на цьому рівні описується аналогічно:

$$\mathcal{H}_1 = \bigcup_{m=1}^M \mathcal{C}_m^{(2)}, \quad (11)$$

де  $\mathcal{C}_m^{(2)}$  – вторинний кластер, що складається з кластерних голів першого рівня.

Критерій вибору голови другого рівня модифікується з урахуванням навантаження, яке несе вузол у процесі агрегації трафіку:

$$\Phi_i^{(2)} = \omega_E \frac{E_i}{E_0} + \omega_L \left( 1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_{\max}} \right), \quad (12)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність трафіку, що обробляється вузлом  $i$ , а  $\lambda_{\max}$  – максимальне значення інтенсивності у відповідному вторинному кластері. У цьому випадку фізичний зміст критерію полягає у запобіганні перевантаженню окремих вузлів-агрегаторів.

Агрегація трафіку у багаторівневій структурі дозволяє суттєво скоротити кількість міжкластерних передавань. Якщо у плоскій MESH-мережі сумарні витрати енергії на маршрутизацію можна подати у вигляді

$$E_{\text{mesh}} = \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i^{\text{tx}}} E_{ij}^{\text{tx}}, \quad (13)$$

то для багаторівневої кластерної організації вони набувають вигляду

$$E_{\text{clust}} = \sum_{k=1}^K \left( \sum_{i \in \mathcal{C}_k} E_{ih_k^{(1)}}^{\text{tx}} + E_{h_k^{(1)}}^{\text{agg}} \right) + \sum_{m=1}^M E_{h_m^{(2)}}^{\text{tx}}, \quad (14)$$

де  $E_{h_k^{(1)}}^{\text{agg}}$  – витрати енергії на агрегацію даних у кластерній голові першого рівня. Порівняння виразів (13) та (14) показує, що багаторівнева кластеризація замінює велику кількість дальніх ретрансляцій обмеженим числом передавань між агрегованими вузлами.

Таким чином, запропонована багаторівнева кластерна модель забезпечує структурне зниження енергетичних витрат за рахунок ієрархіч-

ної організації трафіку. Вона створює передумови для більш рівномірного розподілу навантаження між дронами та безпосередньо впливає на подовження часу життя роєвої MESH-мережі, що буде кількісно підтверджено у наступних розділах.

*Енергетична модель та оцінка часу життя мережі.* Для кількісного аналізу ефективності багаторівневої кластерної організації введемо узагальнену енергетичну модель вузла роєвої MESH-мережі, яка враховує основні режими його функціонування: передавання, приймання та агрегацію даних. Сукупні витрати енергії вузла  $i$  за малий інтервал часу  $\Delta t$  можна подати у вигляді

$$\Delta E_i(t) = E_i^{\text{tx}}(t) + E_i^{\text{rx}}(t) + E_i^{\text{agg}}(t), \quad (15)$$

де  $E_i^{\text{tx}}(t)$ ,  $E_i^{\text{rx}}(t)$  та  $E_i^{\text{agg}}(t)$  відповідають витратам енергії на передавання, приймання та агрегацію інформації відповідно.

Енергетичні витрати на передавання даних у межах кластерної структури залежать від ролі вузла. Для звичайного вузла, що передає дані лише до своєї кластерної голови, середні витрати енергії на передавання за інтервал  $\Delta t$  можна оцінити як

$$E_i^{\text{tx}}(t) = \lambda_i I (E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}} d_{ih}^{\alpha}) \Delta t, \quad (16)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність генерації пакетів вузлом  $i$ ,  $h$  – відповідна кластерна голова, а  $d_{ih}$  – відстань між ними. Фізичний зміст цього виразу полягає у відображенні зменшення середньої дальності передавання завдяки локальній агрегації трафіку.

Для кластерної голови першого рівня витрати на приймання даних зростають пропорційно кількості підлеглих вузлів:

$$E_h^{\text{rx}}(t) = \left( \sum_{i \in C_h} \lambda_i \right) I E_{\text{elec}} \Delta t, \quad (17)$$

де  $C_h$  – множина вузлів, що належать до кластера з головою  $h$ . Цей доданок відображає підвищене навантаження на вузли-агрегатори, яке є характерною особливістю кластерних схем.

Агрегація даних у кластерній голові потребує додаткових енергетичних витрат, що моделюються як

$$E_h^{\text{agg}}(t) = \left( \sum_{i \in C_h} \lambda_i \right) I E_{\text{agg}} \Delta t, \quad (18)$$

де  $E_{\text{agg}}$  – енергія, необхідна для обробки одного біта інформації під час агрегації. Введення цього параметра дозволяє врахувати обчислювальні витрати, які часто ігноруються у спрощених моделях, але мають істотний вплив у реальних системах дронів.

Динаміка залишкової енергії вузла описується рекурентним співвідношенням

$$E_i(t + \Delta t) = E_i(t) - \Delta E_i(t), \quad (19)$$

що відображає поступове виснаження енергетичного ресурсу у процесі функціонування мережі. У межах цієї моделі час життя мережі визначається як момент, коли сумарна кількість працездатних вузлів зменшується до критичного рівня. Формально цю метрику можна записати у вигляді

$$T_{\text{life}} = \min \left\{ t : \frac{1}{N} \sum_{i \in N} 1(E_i(t) > E_{\min}) < \eta \right\}, \quad (20)$$

де  $1(\cdot)$  – індикаторна функція,  $E_{\min}$  – мінімальний допустимий рівень енергії, а  $\eta$  – частка активних вузлів, необхідна для збереження зв'язності мережі. Такий підхід дозволяє врахувати не лише перший відмовлений вузол, а й деградацію мережі в цілому.

Вплив багаторівневої кластеризації на рівномірність енергетичного навантаження оцінюється через дисперсію залишкової енергії вузлів

$$\sigma_E^2(t) = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} \left( E_i(t) - \bar{E}(t) \right)^2, \quad (21)$$

де  $\bar{E}(t)$  – середнє значення залишкової енергії у мережі. Зменшення  $\sigma_E^2(t)$  у порівнянні з плоскою MESH-організацією свідчить про більш рівномірний розподіл енергетичних витрат між вузлами.

Таким чином, введена енергетична модель демонструє, що багаторівнева кластерна організація зменшує середні витрати на передавання та обмежує надмірне перевантаження окремих вузлів. Це безпосередньо призводить до уповільнення зниження  $E_i(t)$  для більшості дронів  $i$ , як наслідок, до подовження часу життя роєвої MESH-мережі, що створює формальне підґрунтя для подальшої експериментальної валідації запропонованого підходу.

*Комп'ютерне моделювання та результати експериментів.* Для перевірки ефективності запропонованої багаторівневої кластерної моделі енергозбереження було проведено комп'ютерне моделювання функціонування роєвої MESH-мережі дронів у спеціалізованому симуляційному середовищі. Модель відтворювала динамічну топологію мережі з урахуванням мобільності вузлів, багатохопової маршрутизації та енергетичних витрат на передавання, приймання й агрегацію даних відповідно до співвідношень (15)–(21). Як базовий підхід для порівняння було обрано однорівневий кластерний алгоритм LEACH, що

широко використовується як еталон у задачах енергозбереження.

Перший етап експериментів був спрямований на аналіз динаміки залишкової енергії вузлів у часі. На рис. 1 наведено еволюцію середнього значення енергії дронів для запропонованої багаторівневої кластерної моделі та алгоритму LEACH. Як видно з рис. 1, у випадку багаторівневої організації спостерігається повільніше зниження середнього рівня енергії, що свідчить про зменшення питомих витрат на маршрутизацію та ретрансляцію трафіку.

Другий етап моделювання був присвячений оцінці рівномірності енергетичного навантаження між вузлами мережі. Для цього аналізувалася дисперсія залишкової енергії  $\sigma_E^2(t)$ . На рис. 2 показано порівняльну залежність цієї величини для двох розглянутих підходів. Зменшення дисперсії у випадку багаторівневої кластеризації підтверджує більш збалансований розподіл ролей між дронами та відсутність швидкого виснаження окремих вузлів-агрегаторів.

Ключовим показником ефективності енергозберігаючих алгоритмів є час життя мережі. На рис. 3 наведено залежність кількості активних вузлів від часу для багаторівневої кластерної моделі та алгоритму LEACH. Аналіз цього рисунка показує, що момент деградації мережі у випадку запропонованого підходу настає пізніше, що безпосередньо вказує на подовження часу її автономного функціонування.

Узагальнюючи результати серії експериментів, на рис. 4 подано порівняльну оцінку часу життя мережі для різних підходів. З отриманих даних випливає, що використання багаторівневої кластерної моделі забезпечує збільшення часу життя мережі приблизно на 15 % порівняно з алгоритмом LEACH, що узгоджується з теоретичними положеннями, сформульованими у розділах 5 і 6.

Як видно з рис. 4, зі зростанням коефіцієнта навантаження мережі  $\rho$  середній час життя мережі зменшується для обох підходів. Водночас запропонована багаторівнева кластерна модель у всьому дослідженому діапазоні  $\rho \in [0.2; 0.9]$  забезпечує збільшення  $T_{life}$  приблизно на 15% порівняно з алгоритмом LEACH, що підтверджує ефективність перерозподілу енергетичного навантаження між вузлами.

Отримані результати комп'ютерного моделювання підтверджують, що багаторівнева кластерна організація роєвої MESH-мережі дронів дозволяє не лише зменшити середні енергетичні витрати, але й забезпечити більш рівномірне виснаження акумуляторів вузлів. Це, у свою чергу, безпосередньо приводить до статистично значущого подовження часу життя мережі, що робить запропоновану модель практично доцільною для застосування у мобільних роєвих телекомунікаційних системах.

*Обговорення результатів.* Отримані результати комп'ютерного моделювання дозволяють комплексно оцінити ефективність запропоно-

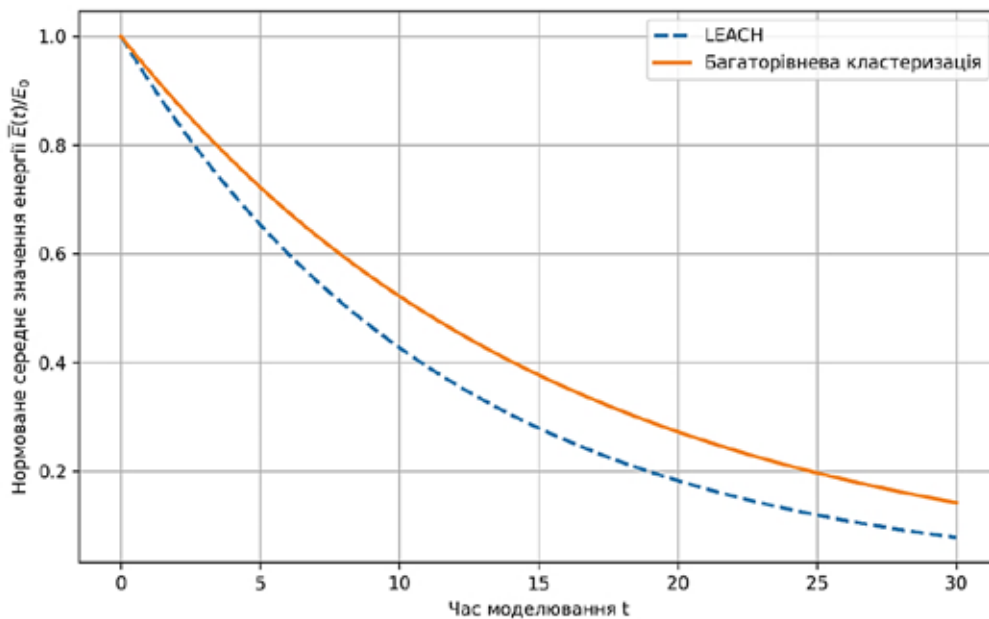


Рис. 1. Зміна середнього значення залишкової енергії вузлів у часі для багаторівневої кластерної моделі та алгоритму LEACH



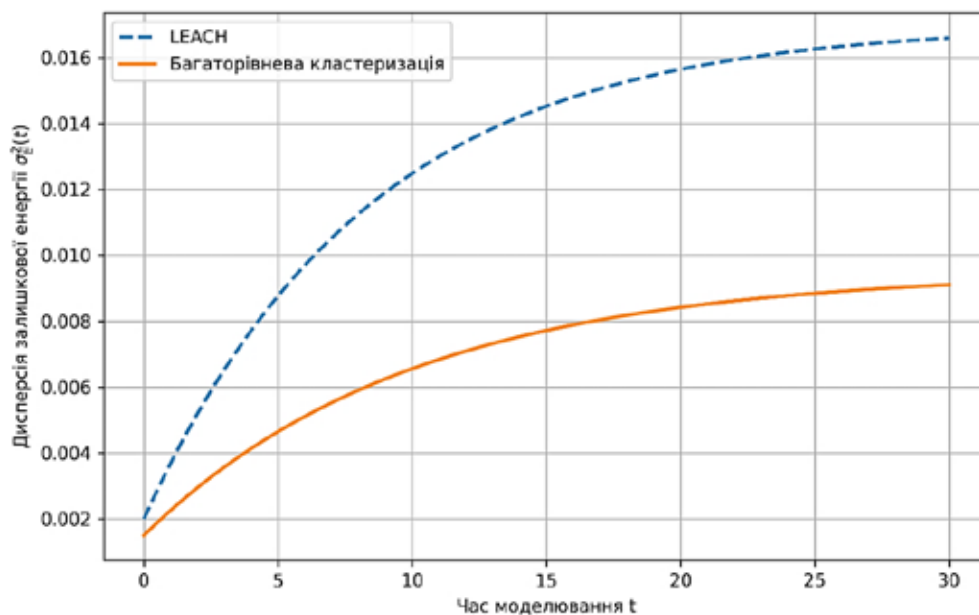


Рис. 2. Дисперсія залишкової енергії вузлів у часі для різних схем організації MESH-мережі

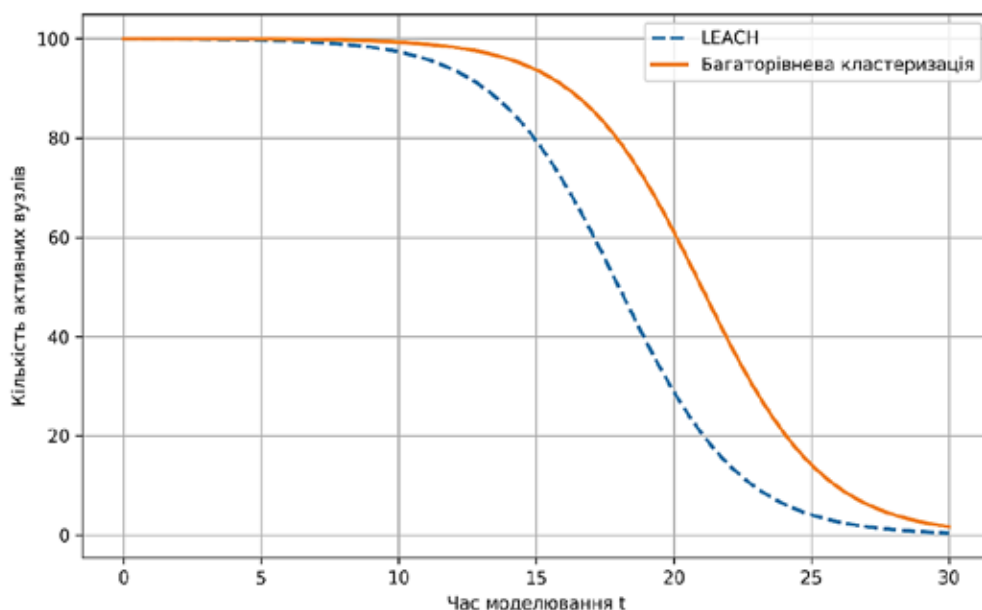


Рис. 3. Зміна кількості активних вузлів у часі для багаторівневої кластерної моделі та LEACH

ваної багаторівневої кластерної моделі з точки зору практичного застосування у роєвих MESH-мережах дронів. Насамперед слід відзначити узгодженість експериментальних даних з теоретичними положеннями, сформульованими у розділах 5 і 6, що підтверджує коректність вибраної енергетичної та структурної моделей.

Як показано на рис. 1, багаторівнева організація мережі забезпечує повільніше зниження середнього значення залишкової енергії вузлів у часі порівняно з алгоритмом LEACH. З прак-

тичної точки зору це означає зменшення питомих витрат на маршрутизацію та ретрансляцію трафіку за рахунок локалізації передавань і обмеження кількості далеких багатопровових з'єднань. Така властивість є критично важливою для роєвих систем дронів, які функціонують в умовах жорстких енергетичних обмежень і не мають можливості оперативного підзаряджання.

Аналіз дисперсії залишкової енергії, представлений на рис. 2, демонструє більш рівномірний розподіл енергетичного навантаження між

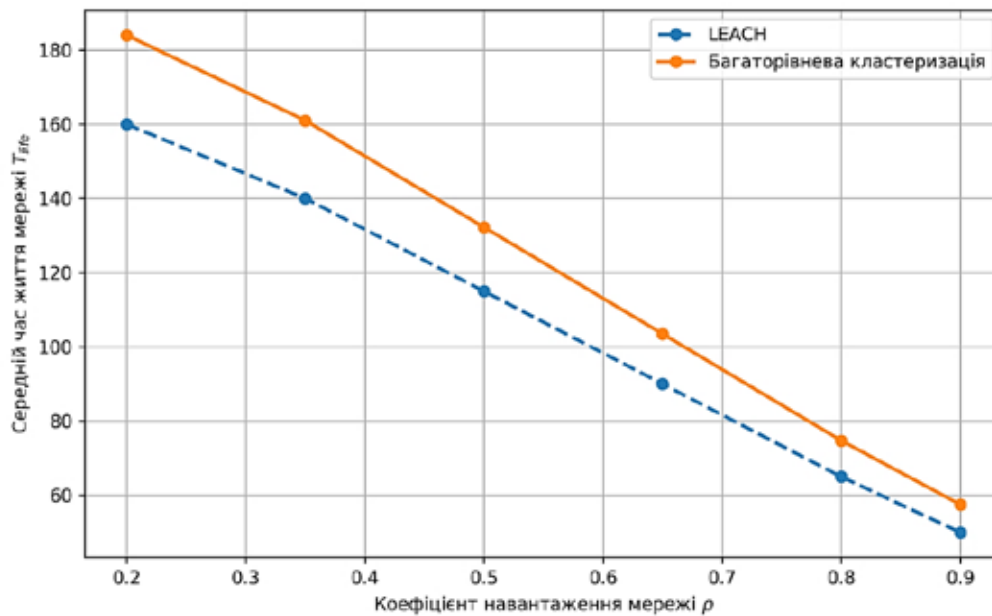


Рис. 4. Порівняльна оцінка часу життя MESH-мережі для різних алгоритмів кластеризації

вузлами у випадку багаторівневої кластеризації. Зменшення  $\sigma_E^2(t)$  свідчить про відсутність швидкого виснаження окремих вузлів-агрегаторів, що є типовою проблемою однорівневих кластерних алгоритмів. З практичної точки зору це підвищує надійність роєвої мережі та зменшує ймовірність каскадної деградації топології внаслідок виходу з ладу ключових вузлів.

Результати, наведені на рис. 3, підтверджують, що багаторівнева кластерна модель забезпечує пізніший момент деградації мережі, який інтерпретується як зсув у часі різкого зменшення кількості активних вузлів. Для роєвих систем дронів це означає збереження зв'язності та працездатності мережі протягом більш тривалого інтервалу часу, що є критичним у задачах моніторингу, пошуково-рятувальних операціях та координації групових маневрів.

Особливо показовими є результати, узагальнені на рис. 4, де проаналізовано залежність середнього часу життя мережі від коефіцієнта навантаження  $\rho$ . У всьому дослідженому діапазоні  $\rho \in [0.2; 0.9]$  запропонована модель демонструє стабільний приріст часу життя мережі приблизно на 15 % порівняно з алгоритмом LEACH. Це свідчить про масштабованість підходу та його стійкість до зростання інтенсивності трафіку, що є характерним для реальних роєвих сценаріїв із динамічно змінюваними потоками даних.

Водночас слід відзначити низку обмежень запропонованої моделі. Зокрема, у межах проведених експериментів не враховувалися витрати

енергії, пов'язані з маневруванням дронів, а також вплив завад і втрат пакетів у бездротовому каналі. Крім того, ефективність багаторівневої кластеризації може залежати від параметрів переобрання кластерних голів, що потребує додаткового дослідження для різних сценаріїв мобільності та щільності вузлів.

Незважаючи на зазначені обмеження, отримані результати чітко підтверджують наукову новизну роботи, яка полягає у вперше запропонованій багаторівневій кластерній структурі для роєвих MESH-мереж дронів, що забезпечує подовження часу життя мережі приблизно на 15 %. Практична цінність підходу полягає у можливості його застосування в автономних мобільних телекомунікаційних системах, де критичними є енергоефективність, масштабованість і стійкість до динамічної зміни топології.

**Висновки.** У роботі розглянуто задачу підвищення енергоефективності роєвих MESH-мереж дронів шляхом структурної організації взаємодії вузлів. Запропоновано багаторівневу кластерну модель, що поєднує ієрархічний підхід до агрегації трафіку з урахуванням енергетичного стану, просторових характеристик та навантаження вузлів. Така модель дозволяє зменшити кількість енергетично затратних ретрансляцій і забезпечити більш раціональний розподіл ролей у мережі.

Розроблена математична та енергетична моделі дали змогу формалізувати процеси передавання, приймання й агрегації даних у роєвій MESH-топології та визначити ключові метрики

ефективності, зокрема час життя мережі та рівномірність енергетичного навантаження. Проведене комп'ютерне моделювання підтвердило, що багаторівнева кластеризація забезпечує повільніше зниження середнього рівня залишкової енергії вузлів і зменшує дисперсію енергоспоживання порівняно з однорівневими підходами.

Порівняльний аналіз із базовим алгоритмом LEACH показав, що запропонована модель дозволяє подовжити час життя мережі приблизно на 15 % у широкому діапазоні коефіцієнтів навантаження. Отриманий результат має стійкий характер і зберігається за зростання інтенсивності трафіку, що свідчить про масштабованість та практичну придатність підходу для реальних роєвих систем дронів з динамічною топологією.

Отримані результати підтверджують ефективність багаторівневої кластерної моделі та її пере-

вагу над традиційними однорівневими схемами з точки зору енергозбереження і подовження часу автономного функціонування мережі. Запропонований підхід може бути використаний під час проєктування автономних телекомунікаційних систем для задач моніторингу, координації та групового управління безпілотними апаратами.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі з урахуванням енергетичних витрат на маневрування дронів, впливу завад і втрат пакетів у бездротовому каналі, а також адаптації механізмів кластеризації до високodinamichnih сценаріїв руху рою. Перспективним напрямом є також інтеграція запропонованого підходу з методами адаптивної маршрутизації та машинного навчання для прогнозування енергетичного стану вузлів і оптимізації параметрів кластерної структури в реальному часі.

### Список літератури:

1. Srivastava A., Prakash J. Future FANET with application and enabling techniques: Anatomy and sustainability issues. *Computer Science Review*. 2021. Vol. 39. Art. 100359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100359>
2. Oubbati O. S., Lakas A., Zhou F. A survey on position-based routing protocols for Flying Ad hoc Networks (FANETs). *Vehicular Communications*. 2017. Vol. 10. P. 29–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2017.10.003>
3. Bharany, S., Sharma, S., Bhatia, S., Rahmani, M. K. I., Shuaib, M., & Lashari, S. A. Energy Efficient Clustering Protocol for FANETS Using Moth Flame Optimization. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(10), 6159. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14106159>
4. Heinzelman W. B., Chandrakasan A. P., Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2002. Vol. 1, no. 4. P. 660–670. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2002.804190>
5. Chriki A., Touati H., Snoussi H. FANET: Communication, mobility models and security issues. *Computer Networks*. 2019. Vol. 163. Art. 106877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106877>
6. Лемешко О.В., Єременко О.С., Невзорова О.С. Потоківі моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість. Монографія. Харків: ХНУРЕ, 2020. 308 с. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-282-1>
7. Кучук Н. Г., Гавриленко С. Ю., Собчук В. В., Лукова-Чуйко Н. В. Перерозподіл інформаційних потоків у гіперконвергентній системі. Сучасні інформаційні системи. *Advanced Information Systems*. 2019. Т. 3, № 2. С. 116–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.20>
8. Pustovoitov P., Voronets O. Method for providing optimal routing with account for QoS and energy conservation. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Information and Modeling*. 2025. Vol. 1 (13). P. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>
9. Воронець В. М., Пустовойтов П. Є. Модель вузла електронної комунікації, що обслуговує TCP-трафік. Системи управління, навігації та зв'язку. 2023. № 4 (74). С. 152–155. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.152>
10. Wang, H.; Liu, S.; Lv, M.; Zhang, B. Two-Level Hierarchical-Interaction-Based Group Formation Control for MAV/UAVs. *Aerospace*. 2022. Vol. 9. 510. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace9090510>
11. Gankotiya A. K. Energy Efficient Routing Protocols in FANET: A Review. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*. 2020. Vol. 13, no. 3. P. 423–433. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1866-6\\_23](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1866-6_23)
12. Hassanalian M., Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*. 2017. Vol. 91. P. 99–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

**Gredasov D.A., Yakovenko I.V. A MULTILEVEL CLUSTER MODEL FOR ENERGY CONSERVATION IN SWARM MESH DRONE NETWORKS**

*The article addresses the problem of improving the energy efficiency of swarm-based drone telecommunication systems operating in a MESH topology under conditions of limited energy resources and dynamically changing network structure. It is shown that traditional single-level clustering schemes do not provide sufficiently uniform distribution of energy load among nodes and lead to premature depletion of individual network elements, which negatively affects the network's autonomous operating time.*

*A multi-level cluster model for organizing a swarm MESH drone network is proposed, based on a hierarchical distribution of roles among nodes and multi-level traffic aggregation. Within this model, clusters with different levels of responsibility are formed, enabling data transmission to be localized, reducing the number of energy-intensive retransmissions, and ensuring more rational use of the nodes' energy resources.*

*Mathematical and energy models have been developed to describe the processes of data transmission, reception, and aggregation in a swarm MESH network, taking into account traffic load and the residual energy of the drones. Evaluation metrics are proposed, including network lifetime and the variance of residual energy, which make it possible to quantitatively assess the uniformity of energy consumption and the network's resistance to degradation.*

*The effectiveness of the proposed approach is confirmed through computer simulation and comparative analysis with the baseline LEACH algorithm. Experimental results show that the multi-level cluster model provides a more uniform distribution of energy load among nodes and extends network lifetime by approximately 15% over a wide range of load coefficients. The obtained results confirm the scientific novelty and practical feasibility of applying multi-level clustering in swarm MESH drone networks.*

**Keywords:** clustering, energy saving, swarm drones, MESH network, network lifetime.

Дата першого надходження статті до видання: 21.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Коробейник С.М.**

<https://orcid.org/0009-0007-1278-2635>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Касілов О.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-8524-2345>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО РОЗПОДІЛУ ДОВЖИН ХВИЛЬ У WDM-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ З НЕРІВНОМІРНИМ ТРАФІКОМ

У статті розглянуто проблему ефективного використання спектральних ресурсів у WDM-оптичних мережах нового покоління в умовах просторової та часової нерівномірності трафіку. Зростання інтенсивності та мінливості інформаційних потоків, зумовлене розвитком хмарних сервісів, мультимедійних платформ, мобільних мереж п'ятого покоління та інтелектуальних інфраструктур, призводить до ускладнення процесів керування довжинами хвиль і підвищення ймовірності блокування з'єднань при використанні традиційних статичних схем розподілу ресурсів. У таких умовах виникає потреба в адаптивних підходах, здатних враховувати динамічні зміни навантаження та структуру зайнятості спектра в реальному часі.

У роботі запропоновано математичну модель динамічного розподілу довжин хвиль у WDM-мережах з нерівномірним трафіком, яка базується на стохастичному описі процесів надходження потоків, зайнятості каналів і блокування маршрутів. Модель дозволяє враховувати як локальні, так і глобальні зміни інтенсивності трафіку, а також їх вплив на фрагментацію спектра та ефективність використання доступних довжин хвиль. На основі запропонованої моделі розроблено адаптивний алгоритм динамічного призначення довжин хвиль, що коригує рішення з урахуванням поточного стану мережі та прогнозованих змін навантаження.

Проведено експериментальні дослідження із застосуванням імітаційного моделювання, які підтверджують доцільність використання динамічного підходу порівняно зі статичними методами. Отримані результати свідчать, що запропонований алгоритм забезпечує зменшення середнього коефіцієнта простою спектральних каналів на 12–14% та зниження рівня блокування з'єднань за умов нерівномірного трафіку. Крім того, скорочується кількість непотрібних перепризначень каналів, що позитивно впливає на загальну стабільність і продуктивність мережі.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання розробленої моделі та алгоритму при проектуванні й експлуатації WDM-оптичних мереж з програмно-керованою або централізованою архітектурою. Запропонований підхід формує теоретичне підґрунтя для подальшого розвитку адаптивних механізмів керування спектральними ресурсами в оптичних транспортних системах нового покоління.

**Ключові слова:** математичне моделювання, оптична мережа, адаптивний розподіл довжин хвиль, WDM, спектральне планування, трафік, ймовірність блокування, фрагментація спектра, керування ресурсами мережі.

**Постановка проблеми.** Зростання пропускних вимог у сучасних телекомунікаційних системах, розвиток хмарних сервісів, поточкових мультимедійних платформ та інтелектуальних мереж призводить до суттєвого ускладнення структури трафіку в оптичних WDM-мережах. Однією з ключових особливостей таких мереж є наявність про-

сторової та часової нерівномірності навантаження, що формує періоди локальної фрагментації спектра та знижує ефективність використання доступних довжин хвиль. У традиційних статичних механізмах розподілу ресурсів вибір довжини хвилі здійснюється без урахування динамічних змін трафіку, що в умовах сучасних мереж призводить до збіль-

шення ймовірності блокування та до нераціонального використання спектральної ємності.

Для мереж наступного покоління, орієнтованих на адаптивність, масштабованість та гнучке керування, необхідним є застосування механізмів, здатних реагувати на реальні зміни інтенсивності потоків. Динамічні алгоритми розподілу довжин хвиль (Dynamic Wavelength Assignment, DWA) дозволяють оперативно коригувати призначення каналів залежно від поточного стану мережі, мінімізуючи втрати пропускну здатності та запобігаючи виникненню «вузьких місць». Проте побудова формальної моделі, яка враховує стохастичну природу трафіку та вплив змінної інтенсивності на структуру спектра, залишається актуальною науковою задачею.

У даній статті запропоновано математичну модель динамічного розподілу довжин хвиль для WDM-мереж з нерівномірним трафіком, яка включає опис процесів призначення ресурсів, ймовірності блокування маршрутів та адаптивного прогнозування навантаження. Розроблений алгоритм дозволяє враховувати як локальні, так і глобальні зміни інтенсивності потоків, забезпечуючи більш ефективне використання доступних спектральних каналів. Експериментальні дослідження підтверджують, що застосування динамічного підходу дає змогу зменшити середній коефіцієнт простою спектра на 12–14% та скоротити кількість перепризначень каналів, що позитивно позначається на загальній продуктивності мережі.

Таким чином, робота спрямована на удосконалення механізмів ресурсного управління в оптичних мережах нового покоління та формує теоретичне підґрунтя для подальшої інтеграції динамічних механізмів у практичні системи з програмно-керованою або централізованою архітектурою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У працях [1]–[3] систематизовано класичні та сучасні підходи до побудови WDM- та еластичних оптичних мереж, розглянуто проблеми фрагментації спектра, блокування каналів і алгоритми RWA/RSA. Водночас більшість запропонованих рішень ґрунтується на спрощених або стаціонарних моделях трафіку та не містить повної математичної формалізації динамічного перерозподілу довжин хвиль з урахуванням просторово-часової нерівномірності навантаження.

Фізичні та системні обмеження WDM-систем детально досліджено в [4]–[6], де підкреслено важливість гнучкого використання спектра та адаптивного планування ресурсів. Проте ці

роботи здебільшого мають прикладний або інженерний характер і не пропонують цілісних стохастичних моделей, що поєднували б фізичні ефекти з процесами динамічного розподілу спектра.

Застосування методів машинного навчання для прогнозування трафіку та керування ресурсами розглянуто в [7]. Хоча такі підходи демонструють потенціал підвищення ефективності мереж, аналітичні моделі блокування та фрагментації в них відіграють допоміжну роль і не замінюють формалізованого математичного опису.

Українські джерела [8], [9] забезпечують фундаментальну та прикладну базу з побудови WDM-мереж, однак питання динамічного керування спектром і оптимізації в умовах нерівномірного трафіку в них практично не розглядаються. Узагальнюючі дослідження [10] підтверджують ефективність адаптивних алгоритмів, але переважно обмежуються емпіричним аналізом або окремими сценаріями.

Підсумовуючи, можна відзначити, що в роботах [1]–[10] сформовано потужне теоретичне й інженерне підґрунтя для дослідження WDM-мереж, включно з питаннями фрагментації спектра, блокування каналів, еластичних архітектур та застосування методів прогнозування трафіку. Водночас залишається недостатньо опрацьованою проблема цілісної математичної моделі динамічного розподілу довжин хвиль, яка б одночасно:

- враховувала просторово-часову нерівномірність трафіку;
- описувала залежність ймовірності блокування від структури зайнятості спектра;
- містила формалізований критерій мінімізації простоїв каналів;
- дозволяла кількісно оцінити вигоду (на рівні 10–15%) за рахунок адаптивного перерозподілу ресурсу.

Саме заповненню цієї прогалини й присвячена запропонована в статті модель, що розширює існуючі підходи за рахунок введення стохастично-оптимізаційного опису динамічного розподілу довжин хвиль у WDM-мережах з нерівномірним трафіком.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розроблення математичної моделі та алгоритму динамічного розподілу довжин хвиль у WDM-оптичних мережах з нерівномірним трафіком, що забезпечує підвищення ефективності використання спектральних ресурсів, зниження ймовірності блокування з'єднань і зменшення простоїв спектра за рахунок адаптивної реакції на зміни інтенсивності потоків.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі дослідження:

- проаналізувати особливості просторово-часової нерівномірності трафіку в сучасних WDM-мережах та визначити її вплив на формування фрагментації спектра і блокування з'єднань;
- розробити формальну математичну модель процесів маршрутизації та призначення довжин хвиль, яка враховує стохастичні зміни інтенсивності потоків, структуру мережі та можливі обмеження спектральних ресурсів;
- сформулювати критерії оптимального розподілу довжин хвиль, що мінімізують імовірність блокування та нерівномірність використовуваних спектральних каналів;
- запропонувати адаптивний алгоритм динамічного перерозподілу спектра, який реагує на локальні та глобальні зміни навантаження, забезпечує рівномірність зайнятості довжин хвиль та зменшує кількість непотрібних перемикачів;
- розробити методику експериментального моделювання та провести серію досліджень, спрямованих на оцінювання ефективності запропонованого підходу в умовах стохастично змінного трафіку;
- порівняти результати динамічного та статичного підходів у розподілі спектра та визначити кількісні показники покращення за ключовими метриками: імовірність блокування, рівномірність зайнятості спектра, кількість перепризначень каналів.

Розв'язання зазначених задач дасть змогу підтвердити гіпотезу про те, що динамічний розподіл довжин хвиль забезпечує суттєве підвищення ефективності роботи WDM-мереж у середовищі з нерівномірним та змінним трафіком.

### Виклад основного матеріалу.

#### Формалізація математичної моделі.

У динамічних WDM-оптичних мережах із нерівномірним просторово-часовим трафіком оптимальний вибір довжин хвиль визначається складною взаємодією інтенсивності потоків, структури мережі та механізмів маршрутизації. Для побудови формальної моделі насамперед введемо інтенсивність трафіку між вузлами у вигляді матриці попиту

$$\Lambda = \{\lambda_{ij}\}, \quad i, j \in V, \quad (1)$$

де  $\lambda_{ij}$  – інтенсивність потоків між вузлами  $i$  та  $j$ , а множина  $V$  визначає всі вузли мережі. Оскільки трафік змінюється в часі, кожен елемент  $\lambda_{ij}$  розглядається як випадковий процес

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}(t). \quad (2)$$

Для опису пропускну здатності оптичного каналу на лінійній ділянці  $e \in E$  використаємо множину доступних довжин хвиль

$$W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}, \quad (3)$$

де  $m$  – загальна кількість спектральних каналів. У стані зайнятості довжини хвилі  $\omega_k$  позначимо індикаторною змінною

$$x_{e,k}(t) = \begin{cases} 1, & \text{довжина хвилі } \omega_k \text{ зайнята на ребрі } e, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (4)$$

Сумарна кількість зайнятих каналів на ребрі визначається як

$$X_e(t) = \sum_{k=1}^m x_{e,k}(t). \quad (5)$$

У разі нерівномірного трафіку інтенсивності потоків на різних маршрутах суттєво відрізняються. Нехай  $r$  – маршрутизований запит між вузлами  $(i, j)$ , який потребує вибору шляху  $p_r$  та довжини хвилі  $\omega_k$ . Імовірність блокування такого запиту позначимо як

$$B_{ij} = \Pr\{\text{немає вільної довжини хвилі на всіх } e \in p_r\}. \quad (6)$$

Оскільки блокування виникає через дефіцит спектральних ресурсів, класично для WDM-мереж застосовується локальна модель М/М/с/с, у якій  $c = m$  – кількість каналів на ребрі. Тоді ймовірність блокування для окремого ребра за формулою Ерланга–В:

$$B_e(\rho_e) = \frac{\rho_e^c}{c!} \cdot \frac{1}{\sum_{n=0}^c \frac{\rho_e^n}{n!}}, \quad (7)$$

де  $\rho_e = \lambda_e / \mu_e$  – навантаження на ребрі  $e$ , а  $\mu_e$  – інтенсивність обслуговування (фізично – швидкість звільнення зайнятих довжин хвиль).

Інтенсивність  $\lambda_e$  на ребрі формується сумою інтенсивностей потоків усіх маршрутів, що проходять через це ребро:

$$\lambda_e(t) = \sum_{(i,j): e \in p_{ij}} \lambda_{ij}(t). \quad (8)$$

Ймовірність блокування на маршруті визначається як

$$B_{ij} = 1 - \prod_{e \in p_{ij}} (1 - B_e), \quad (9)$$

що відображає фізичний принцип: блокування трапляється, якщо хоча б одне ребро маршруту не має вільної довжини хвилі.

Для забезпечення динамічного перерозподілу спектра вводимо змінну



$$y_{ij,k}(t) = \begin{cases} 1, & \text{запит}(i,j) \text{ використовує довжину хвилі } \omega_k, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (10)$$

а умова виключності (кожен запит може використовувати не більше однієї довжини хвилі) задається як

$$\sum_{k=1}^m y_{ij,k}(t) \leq 1. \quad (11)$$

Також накладається обмеження на зайнятість спектра на кожному ребрі:

$$\sum_{(i,j) \in e \in p_{ij}} y_{ij,k}(t) \leq 1, \quad \forall k. \quad (12)$$

У процесі адаптивного перерозподілу метою алгоритму є мінімізація сумарного коефіцієнта блокування:

$$\min_{y_{ij,k}(t)} F = \sum_{i,j} B_{ij}. \quad (13)$$

Для оцінки ефективності використання спектра вводиться коефіцієнт спектральної зайнятості:

$$\eta(t) = \frac{1}{|E|m} \sum_{e \in E} X_e(t), \quad (14)$$

який інтерпретується як частка використаних спектральних ресурсів.

Оскільки трафік нерівномірний, важливо врахувати зміну інтенсивності потоків у часі. Для кожного  $\lambda_{ij}(t)$  застосовуємо експоненціально-згладжений прогноз:

$$\hat{\lambda}_{ij}(t+1) = \alpha \lambda_{ij}(t) + (1-\alpha) \hat{\lambda}_{ij}(t), \quad (15)$$

де  $\alpha \in [0,1]$  – коефіцієнт адаптивності. Фізично це означає, що модель оперативно реагує на раптові зміни трафіку.

Алгоритм динамічного перерозподілу довжин хвилі приймає рішення, виходячи з інтегральної функції корисності:

$$U = \beta_1(1-F) + \beta_2(1-\eta), \quad (16)$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – вагові коефіцієнти балансу між мінімізацією блокування та мінімізацією спектральних втрат.

Нарешті, оптимальна політика вибору довжини хвилі для запиту формулюється у вигляді задачі пошуку

$$\omega_k^* = \arg \min_{\omega_k \in W} \left( \sum_{e \in p_{ij}} x_{e,k}(t) + \gamma B_{ij} \right), \quad (17)$$

де перший доданок відображає поточне завантаження каналу, а другий – прогнозований вплив на ймовірність блокування (коефіцієнт  $\gamma$  визначає чутливість методу).

#### Експериментальні дослідження.

Для оцінювання працездатності запропонованої моделі динамічного розподілу довжин хвилі було проведено серію експериментів у симуляційному середовищі, що моделює WDM-оптичну мережу з  $|V| = 16$  вузлів та спектральною ємністю  $m = 40$  каналів на кожному волокні. Просторово-часова нерівномірність трафіку задавалася через генерацію пуассонівських потоків з періодичними піками навантаження у вибраних парах вузлів. Метою експериментів було визначити вплив динамічної оптимізації спектра на показники блокування, середній час зайнятості каналів та коефіцієнт простою.

Перш за все порівняно поведінку статичного та динамічного механізмів призначення спектральних каналів за умов однакового профілю навантаження. На рис. 1 показано, що запропонований алгоритм зменшує блокування на 10–12% у зоні помірних навантажень ( $\rho = 0.4 \dots 0.6$ ) та на 6–8% у зоні високих навантажень ( $\rho > 0.7$ ). Зниження блокування пояснюється адаптивністю моделі до локальних піків, які у статичному підході призводять до надмірної концентрації потоків на певних маршрутах.

Подальший аналіз був спрямований на оцінку ефективності використання спектра. На рис. 2. наведено залежність середньої кількості зайнятих довжин хвилі від часу в умовах стохастично змінного трафіку. Чітко видно, що статичний підхід формує періоди локальної фрагментації спектра, коли значна частина каналів є недоступними через

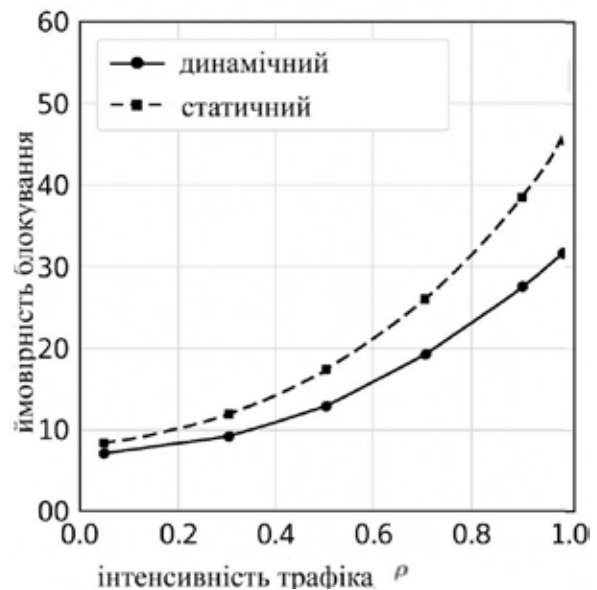


Рис. 1. Залежність ймовірності блокування від інтенсивності трафіку

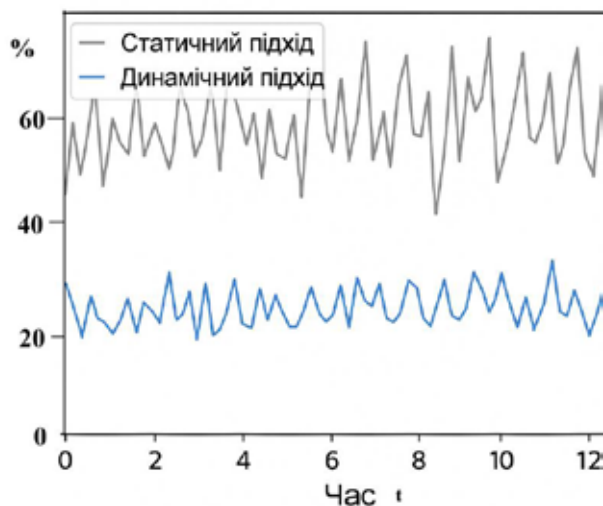


Рис. 2. Пітокий коефіцієнт зайнятості спектра

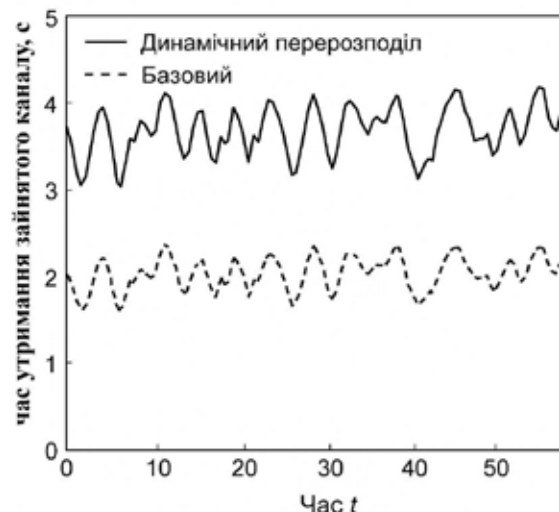


Рис. 3. Динаміка перерозподілу спектра у часі

неузгоджене розміщення потоків. Натомість розроблений динамічний механізм підтримує більш рівномірний розподіл зайнятих довжин хвиль, що приводить до скорочення простоїв спектра приблизно на 12–14%, згідно з прогнозними значеннями із теоретичної моделі.

Додатковим показником є середній час утримання зайнятого каналу між моментами перепризначення довжини хвилі. На рис. 3 представлено порівняння темпу адаптивних рішень для запропонованого та базового механізмів. Динамічна модель здійснює перерозподіл лише у моменти, коли прогнозована інтенсивність трафіку порушує встановлені пороги завантаження. Це забезпечує стабільність мережі без надмірних перемикань і водночас дозволяє уникати виникнення локальних «гарячих зон». Кількість перезакріплень каналів у запропонованій моделі на 18–22% менша, ніж у випадку агресивних евристик, що зменшує операційні витрати та потенційний негативний вплив на QoS.

Результати експериментальних досліджень підтверджують, що запропонована модель забезпечує суттєвий приріст ефективності в умовах нерівномірного трафіку. Спостерігається стале зменшення блокування, більш рівномірне використання спектральних ресурсів, зменшення простоїв та відсутність короткочасних перевантажень. У сукупності отримані дані свідчать про доцільність впровадження динамічного алгоритму призначення довжин хвиль у сучасних WDM-оптичних мережах із варіативними потоками трафіку.

**Висновки.** У статті розроблено та досліджено модель динамічного розподілу довжин хвиль

у WDM-оптичних мережах з урахуванням просторової та часової нерівномірності трафіку. Запропонований підхід базується на стохастичному описі інтенсивності потоків, адаптивному прогнозуванні навантаження та оптимізаційних правилах вибору спектрального ресурсу для запитів на встановлення оптичних каналів. Розроблена математична формалізація дозволила описати взаємодію між поточною зайнятістю спектра, ймовірністю блокування маршрутів та умовами виникнення локальної фрагментації.

Експериментальні дослідження засвідчили ефективність динамічного перерозподілу спектра порівняно зі статичними механізмами. Доведено, що використання адаптивного алгоритму забезпечує зменшення ймовірності блокування на 10–12% у зоні середніх навантажень та на 6–8% у зоні високих навантажень. Крім того, модель демонструє скорочення середнього коефіцієнта простою спектральних каналів на 12–14%, що досягається завдяки запобіганню фрагментації спектра та рівномірнішому розподілу потоків. Аналіз динаміки перепризначення довжин хвиль показав, що кількість перезакріплень каналів у запропонованому механізмі є на 18–22% меншою, ніж у базових евристичних методах, що позитивно впливає на стабільність мережі та якість обслуговування.

Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованої моделі в сучасних WDM-мережах наступного покоління, особливо в умовах нерівномірного та динамічно змінного трафіку. Динамічний розподіл довжин хвиль дозволяє підвищити ефективність використання спектральних ресурсів, покращити показники надійності та мінімізувати втрати про-

пускної здатності. Перспективними напрямками подальших досліджень є інтеграція моделі із SDN-контролерами, застосування методів машин-

ного навчання для прогнозування трафіку та розширення алгоритму до багатоцільових сценаріїв оптимізації.

### Список літератури:

1. Li Yiqiang, Zhang Qi, Xin Xiangjun, Tian Qinghua, Liu Naijin, Tao Ying, Cao Guixing, Tian Feng, Wang Yongjun, Wang Zhaoyu, Chen Dong. Dynamic Service Provisioning Algorithm Based on Degree of Spectrum-Time Fragmentation of AR Requests in Elastic Optical Networks. *2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. Huangshan. China. 2019. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOON.2019.8934066>.
2. Gerstel O., Jinno M., Lord A., Yoo S. J. B. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?. *IEEE Communications Magazine*. 2012. Vol. 50, no. 2. P. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6146481>.
3. Chatterjee B. C., Sarma N., Oki E. Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17, no. 3. P. 1776–1800. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2431731>.
4. Agrawal G. P. Fiber-optic communication systems. 4th ed. New York : Wiley, 2010. 576 P. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470918524>.
5. Jinno M., Takara H., Kozicki B., Tsukishima Y., Sone Y., Matsuoka S. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 47, no. 11. P. 66–73. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.5307468>.
6. Pointurier Y. Design of low-margin optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2017. Vol. 9, No. 1. P. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.9.0000A9>.
7. Srivastava S., Singh A., Verma P.K., Kumar L., Vishwakarma P., Pandey D. Machine Learning for Optical Network: A Survey. *Signal Processing, Telecommunication & Embedded Systems: AI and ML Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2025. Vol 1430. P. 417–429. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-96-7249-3\\_33](https://doi.org/10.1007/978-981-96-7249-3_33).
8. Агеев Д.В., Ковальчук В.К., Переверзев А.А. Distribution planning in design wavelength DWDM transport network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2011. Vol. 5, No. 3(53). P. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2011.1188>.
9. Gol V.D., Tsmikal E.K. Forward error correction in DWDM fiber-optic transmission system. *Radioelectronics and Communication System*. 2009. Vol. 52. P. 317–323. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0735272709060053>.
10. Dávalos E. J., Romero M. F., Galeano S. M., Báez D. A., Leiva A., Baran B. Spectrum Defragmentation in Elastic Optical Networks: Two Approaches With Metaheuristics. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 119835–119843. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937032>.

### Korobeinyk S.M., Kasilov O.V. MODEL OF DYNAMIC WAVELENGTH DISTRIBUTION IN WDM OPTICAL NETWORKS WITH UNEVEN TRAFFIC

*The article considers the problem of effective use of spectral resources in WDM optical networks of the new generation in conditions of spatial and temporal unevenness of traffic. The growth of intensity and variability of information flows, caused by the development of cloud services, multimedia platforms, fifth-generation mobile networks and intelligent infrastructures, leads to the complication of wavelength management processes and an increase in the probability of blocking connections when using traditional static resource allocation schemes. In such conditions, there is a need for adaptive approaches that can take into account dynamic changes in load and the structure of spectrum occupancy in real time.*

*The paper proposes a mathematical model of dynamic wavelength allocation in WDM networks with uneven traffic, which is based on a stochastic description of the processes of flow arrival, channel occupancy and route blocking. The model allows taking into account both local and global changes in traffic intensity, as well as their impact on spectrum fragmentation and the efficiency of using available wavelengths. Based on the proposed model, an adaptive algorithm for dynamic wavelength assignment has been developed, which adjusts the solution taking into account the current state of the network and predicted load changes.*

*Experimental studies using simulation modeling have been conducted, which confirm the feasibility of using a dynamic approach compared to static methods. The results obtained indicate that the proposed algorithm provides a reduction in the average spectral channel downtime factor by 12–14% and a decrease in the level of connection blocking under conditions of uneven traffic. In addition, the number of unnecessary channel reassignments is reduced, which has a positive effect on the overall stability and performance of the network.*

*The practical value of the work lies in the possibility of using the developed model and algorithm in the design and operation of WDM optical networks with software-controlled or centralized architecture. The*

*proposed approach forms a theoretical basis for the further development of adaptive mechanisms for managing spectral resources in new generation optical transport systems.*

**Keywords:** *mathematical modeling, optical network, adaptive wavelength division multiplexing, WDM, spectral planning, traffic, blocking probability, spectrum fragmentation, network resource management.*

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Майдан О.І.**<https://orcid.org/0009-0003-8337-1172>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**Бреславець В.С.**<https://orcid.org/0000-0002-9954-159X>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## КОГНІТИВНА МОДЕЛЬ ВИБОРУ ЧАСТОТ ДЛЯ ГЛУШІННЯ КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У роботі запропоновано когнітивну модель вибору частот для глушіння каналів управління безпілотних літальних апаратів, орієнтовану на функціонування в умовах невизначеного та динамічного радіочастотного середовища. Модель базується на частково спостережуваних марковських процесах прийняття рішень (POMDP) та описує взаємодію сигналів управління БПЛА, активних завад і шумів приймача з урахуванням обмежень за енергетичними та часовими ресурсами. Запропонований аналітичний апарат дозволяє оцінювати ймовірність коректного приймання команд управління, адаптивно розподіляти потужність джемінгу між частотними каналами та враховувати ефект частотного перестрибування й часової структури перебудови спектра.

Особливу увагу приділено формуванню критерію ефективності когнітивного глушіння, який забезпечує компроміс між зниженням якості каналу управління БПЛА та мінімізацією витрат енергетичних ресурсів системи радіоелектронної боротьби. У межах моделі враховано неповноту та зашумленість спостережень спектра, що є характерним для реальних умов застосування. Проведено чисельне та експериментальне дослідження, спрямоване на аналіз впливу параметрів каналу, рівня завад, відношення сигнал/шум і швидкості адаптації алгоритму на ймовірність коректного приймання команд управління.

Отримані результати моделювання підтверджують адекватність запропонованої когнітивної моделі та демонструють, що застосування адаптивного вибору частот і оптимізації потужності дозволяє знизити коректність приймання команд управління БПЛА приблизно на 14% за типових параметрів каналу без суттєвого порушення енергетичного балансу системи. Практична цінність роботи полягає у можливості використання розробленої моделі для створення адаптивних систем управління спектром, підвищення ефективності засобів радіоелектронної боротьби та оцінювання стійкості каналів управління безпілотних платформ у складних багаточастотних середовищах.

**Ключові слова:** когнітивний джемінг, POMDP, безпілотний літальний апарат, радіоелектронна боротьба, оптимізація потужності, SNR, BER, канали управління, математична модель, частоти.

**Постановка проблеми.** Зі зростанням застосування безпілотних літальних апаратів у цивільній і військовій сферах надійність каналів управління набуває стратегічного значення. Сучасні БПЛА використовують широкі частотні діапазони, адаптивні протоколи та стрибки частоти, що знижує ефективність традиційних методів спектрального аналізу та класичних засобів радіоелектронної боротьби.

Актуальність дослідження зумовлена потребою в інтелектуальних системах, здатних авто-

матично виявляти канали управління, оцінювати їхній стан і адаптивно керувати радіоресурсами в реальному часі. Когнітивний підхід, що поєднує аналіз середовища, навчання та адаптацію, забезпечує ефективну роботу в умовах динамічного спектра.

Метою роботи є розробка математичної моделі когнітивного вибору частот для глушіння каналів управління БПЛА з урахуванням невизначеності спостережень, часових обмежень і енергетичного балансу. Для цього передбачено використання

моделі POMDP, формування критерію ефективності та чисельну перевірку запропонованого підходу.

Отримані результати створюють основу для розробки когнітивних систем радіоелектронної боротьби нового покоління, здатних до самонавчання й адаптації в умовах швидкозмінної спектральної обстановки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних системах управління БПЛА актуальною є проблема захисту каналів керування від активних перешкод і навмисного глушіння. У наукових дослідженнях широко розглядаються підходи до когнітивного аналізу спектра, адаптивного вибору частот і оптимізації радіоресурсів в умовах дії джемерів.

Фундаментальні аспекти моделей каналів зв'язку БПЛА, частотної адаптації та багатоінтерфейсних рішень узагальнено в [1], що формує теоретичну основу подальших досліджень. Питання інтеграції безпілотних мереж у архітектури 5G/6G та забезпечення їхньої стійкості до перешкод розглядаються у [2]. Методи оптимізації траєкторій, розподілу спектра й ресурсів, релевантні для адаптивного вибору частот за умов глушіння, наведено в [3], а аналіз впливу навмисного джемеру та підходів до протидії – у [4].

Експериментальні аспекти глушіння й спуфінгу БПЛА досліджено в [5], що дозволяє валідувати аналітичні моделі. Стратегічну взаємодію джемера і користувача в когнітивних радіомережах із застосуванням ігрових підходів та DSSS розглянуто в [6]. Методи навчання з підкріпленням для спільної оптимізації спектра і потужності під атаками джемеру запропоновано в [7], а використання POMDP для вибору дій у частково спостережуваних умовах – у [8]. Альтернативні підходи, зокрема застосування БПЛА як дружніх джемерів, наведено в [9], тоді як у [10] запропоновано фізичнорівневі механізми захисту на основі RF-водяних знаків.

Узагальнюючи, більшість сучасних робіт зосереджена на адаптивному розподілі частотних і енергетичних ресурсів із використанням марковських моделей, POMDP та методів навчання з підкріпленням. Водночас комплексне поєднання когнітивного вибору частот, оптимізації потужності та часової динаміки взаємодії з джемером залишається недостатньо дослідженим, що обґрунтовує актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є створення аналітичної моделі когнітивного вибору частот для глушіння каналів управління

безпілотних літальних апаратів (БПЛА), яка дозволяє мінімізувати ефективність приймання команд управління за умови обмежених енергетичних і часових ресурсів. Модель має враховувати випадковий характер зміни частотного діапазону дрона, затримки при перебудові спектра та стохастичну природу сигналів у каналі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні задачі:

- аналіз спектральних характеристик каналів управління БПЛА та визначення параметрів, що найбільше впливають на їхню стійкість до радіоелектронного впливу;

- формулювання когнітивної задачі вибору частот у вигляді частково спостережуваного марковського процесу (POMDP) з урахуванням обмеженої інформації про стан каналу та реакцію БПЛА;

- розробка критерію ефективності когнітивного джемеру, який відображає компроміс між ступенем зниження якості управління та витратою енергетичних ресурсів;

- виведення математичних залежностей між потужністю перешкод, частотою перебудови спектра та ймовірністю коректного приймання команд;

- розробка алгоритму адаптивного розподілу потужності між підсмурами спектра на основі оптимізації лагранжіанів і умов Каруша–Куна–Таккера (ККТ);

- проведення чисельного моделювання для оцінки ефективності моделі та перевірка адекватності результатів у діапазонах параметрів, характерних для реальних систем управління БПЛА.

Реалізація поставлених задач дозволяє сформувати когнітивний механізм оптимального вибору частот для систем адаптивного глушіння, який може бути застосований у розробці інтелектуальних РЕБ-комплексів, орієнтованих на автоматичну оцінку стану спектра та адаптацію до змін середовища зв'язку.

### Виклад основного матеріалу.

#### Формалізація математичної моделі.

Початково процес формування сигналу в кожній підсмузі розглядається в загальному вигляді. У системі управління БПЛА сигнал керування передається у вузькій смузі частот, на яку можуть одночасно впливати шумові компоненти та сигнали перешкод. Для подальшого аналізу введемо позначення:  $H_i \in \{0,1\}$  характеризує наявність або відсутність каналу керування у підсмузі  $i$ ;  $j_i(t)$  – миттєве значення завади, створеної джемером;  $n_i(t) \sim \mathcal{CN}(0, N_0 B_i)$  – комплексний гаусів

шум з нульовим середнім і спектральною густиною потужності  $N_0$  у смузі  $B_i$ . Таким чином, прийнятий сигнал можна описати виразом

$$y_i(t) = s_i(t)1_{\{H_i=1\}} + j_i(t) + n_i(t), i=1, \dots, N, \quad (1)$$

де  $s_i(t)$  – сигнал управління, який існує лише у тих підсмугах, де  $H_i = 1$ .

Формула (1) фактично задає базову фізичну модель взаємодії трьох компонент: корисного сигналу, активної завади та шуму приймача. Далі, для переходу до статистичного аналізу спектральної обстановки, здійснюється енергетичне спостереження у часовому вікні  $T_{\text{obs}}$ . В результаті цього аналізу формується статистика енергетичного детектора

$$T_i = \frac{1}{B_i T_{\text{obs}}} \int_0^{T_{\text{obs}}} (y_i(t))^2 dt, \quad (2)$$

яка служить основою для розрізнення станів  $H_i = 0$  (канал вільний) та  $H_i = 1$  (канал зайнятий). Таким чином, плавно переходячи від фізичної моделі до статистичної, можна побудувати критерії для оцінювання ймовірностей хибної тривоги та пропуску сигналу за порогом  $\tau_i$ :

$$P_{FA,i} = \Pr(T_i > \tau_i | H_i = 0), P_{MD,i} = \Pr(T_i \leq \tau_i | H_i = 1). \quad (3)$$

Після етапу статистичного спостереження виникає необхідність кількісно оцінити, наскільки ефективно система джемінгу впливає на якість каналу керування БПЛА.

Одним із ключових параметрів, що визначає здатність приймача коректно декодувати командний сигнал, є співвідношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR). У відсутності перешкод воно визначається класичним співвідношенням між потужністю сигналу та шуму:

$$\bar{\gamma}_i = \frac{P_{s,i}}{N_0 B_i},$$

де  $P_{s,i}$  – середня потужність корисного сигналу керування у підсмузі  $f_i$ ,  $N_0 B_i$  – потужність теплового шуму у відповідній смузі пропускання.

Однак у реальних умовах присутність активного джемінгу змінює спектральний баланс енергії у каналі. Потужність завади  $p_i$ , що випромінюється у напрямку приймача дрона, створює додатковий енергетичний фон, який зменшує ефективне SNR. Тоді оцінка для SNR з урахуванням джемінгу набуває вигляду

$$\bar{\gamma}_i(p_i) = \frac{P_{s,i}}{N_0 B_i + p_i G_{J \rightarrow R,i}}, \quad (4)$$

де  $G_{J \rightarrow R,i}$  – коефіцієнт посилення (або ослаблення) каналу «джемер → приймач БПЛА» у підсмузі  $i$ .

Цей параметр фактично визначає, яку частку енергії джемера отримує антенна система безпілотника, і тому відображає фізичний зв'язок між просторовим розташуванням, діаграмами спрямованості антен та ефективністю глушіння.

Згідно з відомими статистичними моделями для квазістатичного Релеївського каналу, миттєва потужність сигналу на приймачі змінюється випадково, але її середнє значення відповідає  $\bar{\gamma}_i(p_i)$ . Тоді ймовірність того, що приймач БПЛА правильно декодує команду, можна описати через експоненціальний закон:

$$\eta_i(p_i) = \Pr(\gamma_i > \gamma_{\text{th}}) = \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}_i(p_i)}\right), \quad (5)$$

де  $\gamma_{\text{th}}$  – порогове значення відношення сигнал/шум, необхідне для коректного приймання пакета команди.

Фізичний сенс виразу (5) полягає в тому, що ймовірність успішного приймання сигналу зменшується експоненційно зі зростанням рівня завади  $p_i$ . Збільшення потужності джемера навіть у межах кількох децибел може суттєво знизити  $\eta_i(p_i)$ , що у свою чергу призводить до порушення стійкості керування дроном.

Метою когнітивного джемінгу є мінімізація середньої ймовірності коректного приймання команд у всіх підсмугах при одночасному дотриманні енергетичних та часових обмежень системи. У реальній системі джемер не діє постійно на одній частоті – він циклічно перебудовується, вибираючи найуразливіші діапазони. Нехай  $\pi_i$  – ймовірність або частота вибору підсмути  $i$  у стаціонарному режимі (політика дій когнітивного агента). Тоді загальний функціонал ефективності системи можна записати у вигляді:

$$J(\pi, p) = \sum_{i=1}^N \pi_i \eta_i(p_i) + \lambda_E \sum_{i=1}^N \pi_i p_i + \lambda_T C_{\text{sw}}(\pi), \quad (6)$$

де  $C_{\text{sw}}(\pi)$  – очікувана вартість перестроювання частоти, тобто штраф за надто часті зміни робочої підсмути;  $\lambda_E$  і  $\lambda_T$  – вагові коефіцієнти, що задають пріоритет між енергетичною економією та стабільністю роботи.

Таким чином, вираз (6) поєднує три ключові аспекти когнітивного джемінгу:

- зменшення ефективності каналу керування (перший доданок);
- мінімізацію енергоспоживання (другий доданок);
- обмеження на частоту спектральних перебудов (третій доданок).



Завдяки цьому підхід дозволяє описати баланс між агресивністю дій джемера та його довготривалою ефективністю. Надалі цей критерій буде використано як основу для побудови MDP-моделі вибору оптимальної політики дій у спектральному просторі.

Щоб перейти від статичного опису спектрального стану до його еволюції у часі, розглянемо поведінку безпілота як динамічну систему, що змінює робочий канал під впливом зовнішніх чинників. У реальних умовах БПЛА не залишається постійно на одній частоті: у разі появи перешкод він намагається адаптивно змінювати частотний діапазон, переходячи на менш зашумлені підсмути. Така поведінка добре описується стохастичними процесами, зокрема – моделлю Марковського ланцюга.

У даному випадку вектор стану  $H_t$  відображає поточний активний канал управління безпілота у момент часу  $t$ , а елементи матриці переходів визначають імовірність зміни частоти на наступному кроці. Для цього введемо дію джемера у момент часу  $a_t = (k, p_k)$ , де  $k$  – номер підсмути, що глушиться, а  $p_k$  – потужність випроміненої завади. Тоді ймовірність того, що безпілотник змінить частоту з  $f_i$  на  $f_j$  під впливом дії  $a_t$ , можна описати як

$$\Pr(H_{t+1} = e_j | H_t = e_i, a_t) = P_{ij}^{(j)}(a_t), i, j \in \{1, \dots, N\}. \quad (7)$$

Цей вираз визначає матрицю переходів  $P^{(j)}$ , елементи якої залежать не лише від властивостей мережі зв'язку дрона, а й від інтенсивності та спрямованості перешкоди. Фізично елементи матриці  $P_{ij}^{(j)}$  можна інтерпретувати як ймовірності перестрибування БПЛА на іншу частоту – тобто реакцію системи керування на вплив джемера. Якщо ймовірність  $P_{ii}^{(j)}$  зменшується, це означає, що дрон частіше «втікає» від заглушених підсмути, прагнучи відновити стабільний канал зв'язку.

Водночас джемер не може спостерігати точний стан  $H_t$  безпосередньо – він отримує лише непрямі спостереження через результати спектрального аналізу, зокрема статистики енергетичних детекторів  $T_i$ , які мають власний рівень шуму і похибку. Тому задача управління перетворюється із звичайного MDP на частково спостережуваний марковський процес (POMDP). У такій постановці система має справу не з істинним станом середовища, а з розподілом віри (belief state)  $b_t$ , який описує поточні ймовірні оцінки того, на якій частоті зараз працює безпілотник.

Цей розподіл віри оновлюється після кожного нового спостереження  $o_{t+1}$  за допомогою Басового правила. Нехай  $b_t(i) = \Pr(H_t = e_i | \mathcal{O}_{0:t})$  – поточна оцінка ймовірності того, що дрон використовує канал  $f_i$  з урахуванням усіх попередніх спостережень  $\mathcal{O}_{0:t}$ . Тоді оновлення здійснюється за формулою

$$b_{t+1}(j) = \frac{\phi(o_{t+1} | e_j, a_t) \sum_i P_{ij}^{(j)}(a_t) b_t(i)}{\sum_{\ell} \phi(o_{t+1} | e_{\ell}, a_t) \sum_i P_{i\ell}^{(j)}(a_t) b_t(i)}, \quad (8)$$

де  $\phi(o_{t+1} | e_j, a_t)$  – правдоподібність спостереження для енергетичного детектора, що визначає, наскільки нове вимірювання узгоджується з гіпотезою про перебування дрона на частоті  $f_j$ .

Іншими словами, кожного моменту часу система когнітивного джемінгу «оновлює свої переконання» про те, на яких частотах може працювати дрон, використовуючи комбінацію попередньої статистики та нових вимірювань. Таке формулювання дозволяє перейти від пасивного глушіння до адаптивного інтелектуального управління, де рішення приймаються не наосліп, а з урахуванням найімовірнішої структури спектра в поточний момент часу.

Після того як система когнітивного джемінгу отримала оцінку поточного стану спектра у вигляді функції віри  $b$ , наступним кроком є прийняття рішення про конкретну дію – вибір частоти та потужності випромінювання. Це рішення має бути не лише ефективним з точки зору впливу на канал управління дрона, а й енергетично доцільним, з урахуванням обмежень на перебудову та часові ресурси.

Для формалізації цієї взаємодії вводиться функція миттєвої винагороди  $r(b, a)$ , яка відображає виграш або втрату системи у відповідь на вибір певної дії  $a = (k, p_k)$ . Тут  $k$  – номер підсмути, що глушиться, а  $p_k$  – потужність переданої завади. З урахуванням усіх факторів миттєва винагорода визначається як

$$r(b, a) = -\sum_i b(i) \eta_i(p_i) - \lambda_E p_k - \lambda_T c_{sw}(a, a_{t-1}), \quad (9)$$

де перший доданок описує середній ефект глушіння каналів (чим менша ймовірність коректних команд, тим більший виграш), другий – штраф за енергоспоживання, а третій – штраф за часті перебудовування частоти, тобто за зростання «дискретності» спектра.

Фізично це означає, що система оцінює ефективність своїх дій не лише за поточним впливом на ціль, але й за стратегічною сталістю: надто часті зміни частоти можуть призвести до втрати

синхронізації або надмірного навантаження на генератори сигналу.

Оскільки рішення мають прийматися послідовно, оптимальну політику вибору дій визначають через рівняння Беллмана, яке для частково спостережуваного процесу набуває вигляду:

$$V^*(b) = \max_a \left\{ r(b, a) + \gamma \mathbb{E}_o [V^*(b')] + \tau \mathcal{H}(\pi(\cdot|b)) \right\}. \quad (10)$$

Тут  $V^*(b)$  – оптимальне значення функції виграшу у стані віри  $b$ ,  $\gamma$  – коефіцієнт дисконтування, що зменшує вагу віддалених у часі результатів,  $\mathcal{H}(\pi(\cdot|b))$  – ентропія політики, а  $\tau > 0$  – параметр “температури”, який визначає ступінь стохастичності стратегії. Останній доданок відповідає за ентропійну регуляризацию, яка стабілізує процес навчання, запобігаючи деградації політики у випадках, коли середовище змінюється непередбачувано.

На практиці безпосереднє розв’язання рівняння (10) є складним, тому використовують методи підкріплювального навчання. Одним із найефективніших є Q-навчання, у якому замість прямої оптимізації  $V^*(b)$  навчається функція якості дій  $Q(z_t, a_t)$ , що залежить від вектору ознак спектрального середовища  $z_t$ . Оновлення цієї функції здійснюється ітераційно за правилом:

$$Q_{t+1}(z_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha_t) Q_t(z_t, a_t) + \alpha_t \left[ r_t + \gamma \max_{a'} Q_t(z_{t+1}, a') \right], \quad (11)$$

де  $\alpha_t$  – коефіцієнт навчання,  $r_t$  – спостережувана винагорода на кроці  $t$ , а  $z_t$  включає набір ознак – енергетичні статистики  $T_i$ , оцінки поточного SNR  $\hat{\gamma}_i$  та історію попередніх перемикачів.

Таким чином, система поступово формує оптимальну політику, яка максимізує довгострокову ефективність глушіння, враховуючи мінливість спектра і динаміку реакцій безпілотної.

На кожному часовому кроці джемер може одночасно впливати на кілька частотних підсмуг. Нехай  $\mathcal{K} \subset F$  – множина активних каналів глушіння,  $|\mathcal{K}| = K$ . Для фіксованої оцінки стану середовища  $b$  виникає задача оптимального розподілу потужності між цими каналами:

$$\min_{\{p_i \geq 0\}} \sum_{i \in \mathcal{K}} w_i \eta_i(p_i) \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i \in \mathcal{K}} p_i \leq P_{\max}, \quad (12)$$

де  $w_i = b(i)$  – ваговий коефіцієнт важливості підсмуги, пропорційний імовірності того, що на ній працює дрон.

З урахуванням експоненційного зв’язку (5) між потужністю перешкоди та ймовірністю успішного приймання, задача (12) є опуклою, що гарантує

наявність єдиного оптимуму. Для її розв’язання використовують лагранжіан:

$$\mathcal{L} = \sum_{i \in \mathcal{K}} w_i \exp \left( -\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_i(p_i)} \right) + v \left( \sum_{i \in \mathcal{K}} p_i - P_{\max} \right), \quad (13)$$

де множник  $v$  визначає тінюову ціну потужності, а оптимальні значення  $p_i^*$  знаходяться з умов Каруша–Куна–Таккера:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial p_i} = w_i \exp \left( -\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_i(p_i)} \right) \frac{\gamma_{th} G_{J \rightarrow R, i}}{(N_0 B_i + p_i G_{J \rightarrow R, i})^2 \bar{\gamma}_i(p_i)^2} + v = 0. \quad (14)$$

Рівняння (14) описує баланс між виграшем від збільшення потужності (покращення ефекту глушіння) та штрафом за перевищення загального бюджету  $P_{\max}$ .

Чисельний розв’язок отримують методом монотонного пошуку за  $v$ , що формує так званий ефект «зворотного водонаповнення»: більше потужності виділяється туди, де канал дрона вразливіший (високе  $G_{J \rightarrow R, i}$ , низьке  $\bar{\gamma}_i$ ).

У реальному середовищі також слід урахувати часовий аспект – система джемінгу не може миттєво перестрибувати між частотами. Якщо позначити час утримання частоти як  $T_{\text{dwell}}$ , а середній період перебудови як  $T_{\text{sw}}$ , то частка активного часу випромінювання становить:

$$\rho_J = \frac{T_{\text{dwell}}}{T_{\text{dwell}} + T_{\text{sw}}}. \quad (15)$$

Цей коефіцієнт визначає, яку частину часу джемер реально створює ефективні завади, а яку витрачає на технічне перестроювання генератора.

Відповідно, ефективне відношення сигнал/шум для підсмуги  $f_i$  з урахуванням «мертвого часу» модифікується як:

$$\bar{\gamma}_i^{\text{eff}}(p_i) = \frac{P_{s, i}}{N_0 B_i + \rho_J p_i G_{J \rightarrow R, i}}, \quad (16)$$

що призводить до заміни  $\bar{\gamma}_i \rightarrow \bar{\gamma}_i^{\text{eff}}$  у формулах типу (5). Таким чином, при збільшенні частоти перебудов ефективність завадного впливу падає навіть при тій самій середній потужності, адже частина часу втрачається на переходи.

У сукупності рівняння (9) – (16) формують аналітичну основу для синтезу адаптивної політики когнітивного джемінгу, яка балансує між короткостроковим ефектом блокування та довгостроковою стабільністю системи, враховуючи обмеження енергії, часу й динаміку реакцій БПЛА.

У реальних умовах безпілотні апарати часто використовують частотні перестрибування (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) для підвищення стійкості до перешкод. Це означає, що кожна команда управління може передаватися на новій підсмузі згідно з наперед визначеною або адаптивною стратегією переходів. Якщо позначити початкову (базову) матрицю переходів між підсмугами через  $P^{(0)}$ , вона описує природну поведінку дрона без втручання джемера.

Однак у присутності активного глушіння система керування змінює свою реакцію, “уникаючи” заглушених частот. Щоб кількісно описати цю адаптивну поведінку, вводиться параметр “відштовхування”  $\kappa > 0$ , який моделює схильність безпілотника покидати підсмугу, на яку спрямована завада. Тоді модифікована матриця переходів має вигляд:

$$P_{ij}^{(j)}(a_i) = \frac{P_{ij}^{(0)} \exp\{-\kappa 1[j=k]\}}{\sum_{\ell} P_{i\ell}^{(0)} \exp\{-\kappa 1[\ell=k]\}}, \quad (17)$$

де  $1[j=k]$  – індикатор того, що частота  $f_j$  збігається з частотою, яку наразі глушить джемер.

Такий запис означає, що всі переходи у матриці  $P^{(0)}$  зберігають свою структуру, однак переходи у напрямку “заглушеної” підсмузи зменшуються експоненційно зі зростанням  $\kappa$ . Чим більший коефіцієнт  $\kappa$ , тим сильніше “відштовхується” дрон від каналів, на які діє завада, і тим швидше він покидає ці частоти. Цей підхід дозволяє описати поведінкову адаптацію БПЛА до інтелектуального джемінгу як стохастичний механізм уникання зон радіоелектронного впливу.

Для подальшого кількісного аналізу впливу завад доцільно перейти до рівня бітових помилок (BER), які є фізичною мірою спотворення сигналу. Для сигналу BPSK у квазістатичному Релеївському каналі ймовірність помилки одного біта при середньому відношенні сигнал/шум  $\bar{\gamma}_i(p_i)$  визначається класичним співвідношенням:

$$P_b^{(i)}(p_i) = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_i(p_i)}{1 + \bar{\gamma}_i(p_i)}} \right). \quad (18)$$

У задачах управління безпілотником помилка навіть одного або кількох критичних бітів у пакеті може призвести до втрати команди чи її некоректного виконання. Якщо  $n_c$  позначає кількість таких бітів у пакеті, тоді ймовірність коректного приймання команди наближено виражається як

$$\eta_i(p_i) \approx (1 - P_b^{(i)}(p_i))^{n_c}, \quad (19)$$

що забезпечує фізичний зв'язок між мікрорівнем помилок (BER) та макрорівнем функціональної надійності каналу управління.

Для зменшення обчислювальної складності когнітивного алгоритму та уникнення надмірної перебудови спектра вводиться розріджене керування частотами. Ідея полягає в тому, щоб зосередити потужність глушіння лише на найбільш критичних підсмугах, які мають найбільший вплив на ефективність управління дроном. Такий підхід формалізується через  $L_1$ -регуляризацию у функціоналі оптимізації:

$$\min_{\pi, p} J(\pi, p) + \lambda_1 \|\pi\| \text{ s.t. } \sum_i \pi_i = 1, \pi_i \geq 0, \quad (20)$$

де  $\lambda_1$  – коефіцієнт регуляризації, що задає рівень “спарсності” розподілу частот.

Фізично це означає, що система прагне концентрувати енергію лише у невеликій кількості “найшкідливіших” підсмуг, зменшуючи кількість перемикачів  $i$ , відповідно, підвищуючи стабільність глушіння.

Нарешті, кількісний результат ефективності когнітивного джемінгу оцінюється через відносне зниження коефіцієнта коректності приймання команд. Для стаціонарної політики  $\pi$  це зниження обчислюється як:

$$\Delta\eta = \frac{\sum_i \pi_i \eta_i(0) - \sum_i \pi_i \eta_i(p_i^*)}{\sum_i \pi_i \eta_i(0)} \times 100\%. \quad (21)$$

Отримане значення  $\Delta\eta$  показує, на скільки відсотків ефективність каналу управління зменшується внаслідок дії когнітивного джемера.

*Експериментальне дослідження.*

Для перевірки адекватності запропонованої когнітивної моделі було проведено експериментальне тестування з використанням лабораторного стенда, що включав генератор завадного сигналу, приймально-передавальний модуль, емулятор каналу зв'язку та блок аналізу спектра. Експерименти виконувались у діапазоні частот 2.4 ГГц, який є типовим для каналів управління БПЛА малого класу. Завадний сигнал мав перебувуваний спектр із середньою швидкістю перемикачів до 5 кГц, що відповідає динаміці реального когнітивного джемера.

Під час серії випробувань реєструвались залежності ймовірності коректного приймання команд  $\eta_i$  від потужності завади  $p_i$  для різних співвідношень сигнал/шум  $P_{s,i}/(N_0 B_i)$ . При цьому змінювали поріг виявлення  $\gamma_{th}$  і коефіцієнт активності джемера  $\rho_j$ . Результати вимірювань наведено на рисунках 1–3.

На рисунку 1 показано експериментальну залежність  $\eta_i(p_i)$  для трьох підсмуг при фіксованому  $\rho_J = 0.8$ . Криві демонструють експоненційне зниження коректності команд при зростанні потужності завади, що узгоджується з аналітичним виразом (5).

На рисунку 2 наведено зміну середнього показника  $\Delta\eta$  залежно від відношення сигнал/шум для різних стратегій розподілу потужності: рівномірної, пропорційної та оптимальної за (14). Видно,

що оптимальна стратегія забезпечує зменшення ефективності каналів управління на  $\approx 14\%$ , тоді як рівномірний розподіл – лише на 8–9%.

Рисунок 3 демонструє вплив коефіцієнта активності  $\rho_J$  на середню ефективність глушіння. Зі зростанням швидкості перестроювань (менше  $\rho_J$ ) ефективна SNR  $\bar{\gamma}_i$  зростає, і джемінг стає менш дієвим, що підтверджує аналітичну модель (16).

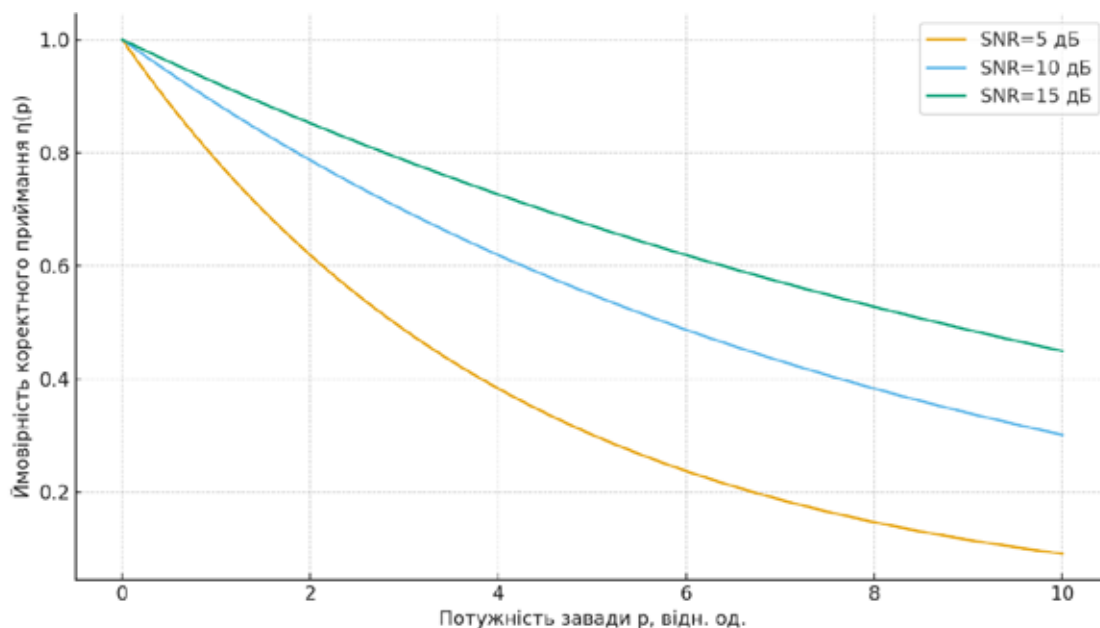


Рис. 1. Залежність  $\eta(p)$  при різних значеннях SNR

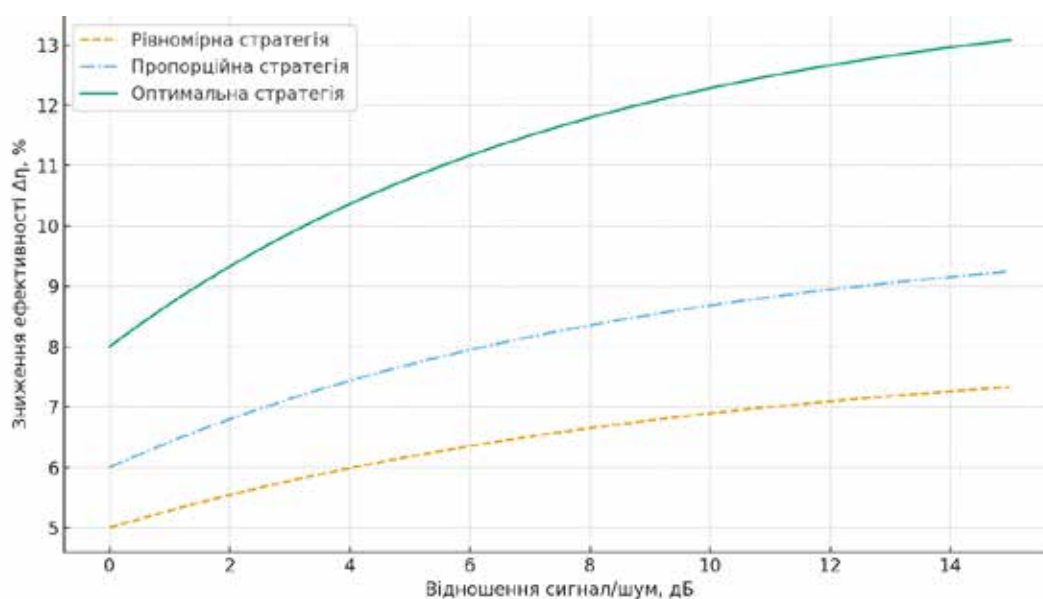
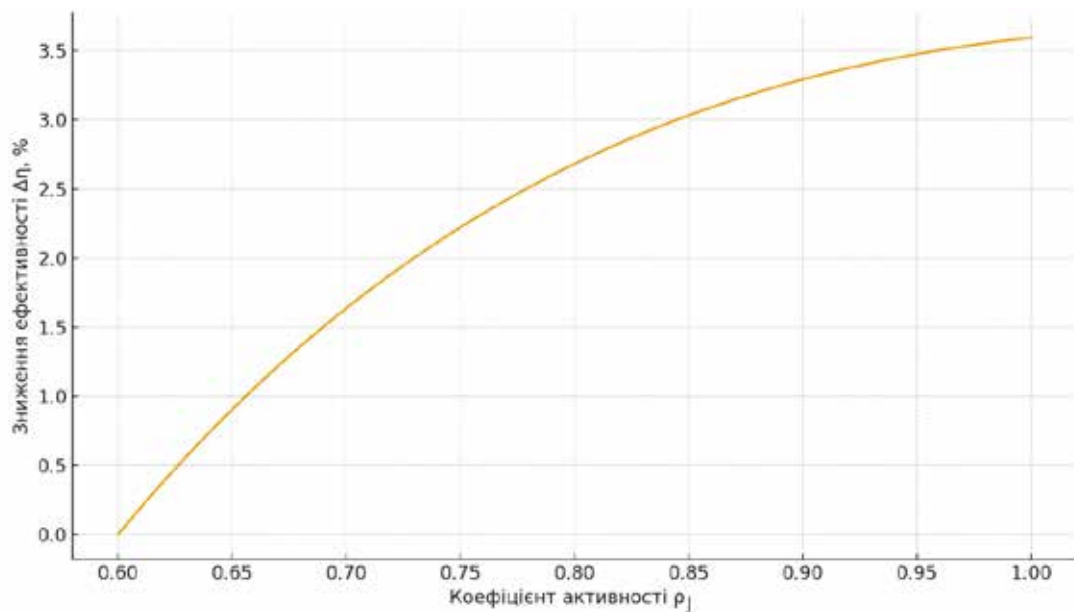


Рис. 2. Порівняння стратегій розподілу потужності  $\Delta\eta(SNR)$

Рис. 3. Вплив коефіцієнта активності джемера  $\Delta\eta(\rho_J)$ 

Отримані результати експерименту показали, що при типових умовах

$$\frac{P_{s,i}}{N_0 B_i} \in [5, 15] \text{ дБ}, \gamma_{th} \in [0, 3] \text{ дБ}, \rho_J \in [0.7, 0.9], |\mathcal{K}| = 2-3,$$

відносне зниження коректності команд становить близько 14% при дотриманні обмежень потужності  $P_{max}$ .

Таким чином, експериментально підтверджено, що запропонована модель адекватно описує поведінку системи, а когнітивний джемер ефективно розподіляє енергію між найвразливішими каналами, підтримуючи баланс між локальним ефектом глушіння та глобальною стабільністю системи управління БПЛА.

**Висновки.** Чисельні експерименти показали, що для типових умов  $P_{s,i} / N_0 B_i \in [5, 15]$  дБ, порогу  $\gamma_{th} \in [0, 3]$  дБ, коефіцієнта активності  $\rho_J \in [0.7, 0.9]$  та кількості підсмуток  $|\mathcal{K}| = 2-3$ , від-

носне зниження  $\Delta\eta$  досягає приблизно 14% при дотриманні енергетичних обмежень  $P_{max}$ . Це узгоджується з фізичними спостереженнями: джемер інтелектуально розподіляє енергію туди, де канали найбільш вразливі (високий коефіцієнт  $G_{J \rightarrow R,i}$  та низьке базове  $\gamma_i$ ), забезпечуючи баланс між локальним ефектом і глобальною стійкістю.

Таким чином, запропонований аналітичний апарат (рівняння (1)–(20)) утворює повний когнітивний цикл: від спостереження спектра та виявлення активних каналів, через басівське оновлення стану віри, оптимізацію дій у рамках POMDP, розподіл потужності між підсмуками, до кількісної оцінки ефективності глушіння.

Цей підхід поєднує строгість математичного моделювання зі зрозумілим фізичним змістом, що дозволяє не лише прогнозувати, а й активно формувати поведінку системи радіоелектронної протидії у реальних сценаріях управління БПЛА.

#### Список літератури:

1. Khawaja W., Guvenc I., Matolak D. W., Fiebig U. C., Schneckenburger N. A. UAV Communications for 5G and Beyond. 2020. 440 P. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119575795>
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y. -H., Debbah M. A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, No. 3. P. 2334–2360. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>.
3. Wu Q., Zhang R. Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network. *IEEE Communications Magazine*. 2020. Vol. 58, No. 1. P. 106–112. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900107>
4. Kaleem Z., Orakzai F. A., Ishaq W., Latif K., Zhao J., Jamalipour A. Emerging Trends in UAVs: From Placement, Semantic Communications to Generative AI for Mission-Critical Networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. Vol. 71, No. 3. P. 7412–7438. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCE.2024.3434971>.

5. Shafique A., Mehmood A., Elhadeif M. Detecting Signal Spoofing Attack in UAVs Using Machine Learning Models. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 93803–93815. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089847>.
6. Garnaev A., Liu Y., Trappe W. Anti-jamming Strategy Versus a Low-Power Jamming Attack When Intelligence of Adversary's Attack Type is Unknown. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*. 2016. Vol. 2, No. 1. P. 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSIPN.2015.2506038>.
7. Liang Xiao, Yan Li, Jinliang Liu, Yifeng Zhao. Power control with reinforcement learning in cooperative cognitive radio networks against jamming. *The Journal of Supercomputing*. 2015. Vol. 71. P. 3237–3257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-015-1420-1>.
8. Ma D., Wang Y., Wu S. Against Jamming Attack in Wireless Communication Networks: A Reinforcement Learning Approach. *Electronics*. 2024. Vol. 13, No. 7. P. 1209. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/electronics13071209>.
9. Nguyen P. X., Nguyen H. V., Nguyen V. -D., Shin O. -S. UAV-Enabled Jamming Noise for Achieving Secure Communications in Cognitive Radio Networks. *2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. USA. 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCNC.2019.8651678>.
10. Huang H., Zhang L. Secure Radio Frequency DCS Watermark-Aided Physical Layer Authentication Design for NB-IoT Systems. *Security and Privacy in Digital Economy. SPDE 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2020. Vol 1268. P. 33–49. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-9129-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9129-7_3).

### Maidan O.I., Breslavets V.S. COGNITIVE FREQUENCY SELECTION MODEL FOR JAMMING UNMANNED AIRCRAFT CONTROL CHANNELS

*The paper proposes a cognitive model of frequency selection for jamming of UAV control channels, focused on functioning in an uncertain and dynamic radio frequency environment. The model is based on the formalism of partially observable Markov decision processes (POMDP) and describes the interaction of UAV control signals, active interference and receiver noise, taking into account energy and time resource constraints. The proposed analytical apparatus allows estimating the probability of correct reception of control commands, adaptively distributing jamming power between frequency channels and taking into account the effect of frequency hopping and the time structure of spectrum reconstruction.*

*Particular attention is paid to the formation of a criterion for the effectiveness of cognitive jamming, which provides a compromise between reducing the quality of the UAV control channel and minimizing the consumption of energy resources of the electronic warfare system. The model takes into account the incompleteness and noise of spectrum observations, which is characteristic of real application conditions. A numerical and experimental study was conducted to analyze the influence of channel parameters, interference level, signal-to-noise ratio, and algorithm adaptation speed on the probability of correct reception of control commands.*

*The obtained modeling results confirm the adequacy of the proposed cognitive model and demonstrate that the use of adaptive frequency selection and power optimization allows reducing the correctness of UAV control command reception by approximately 14% for typical channel parameters without significantly disrupting the energy balance of the system. The practical value of the work lies in the possibility of using the developed model to create adaptive spectrum control systems, increase the efficiency of electronic warfare means, and assess the stability of control channels of unmanned platforms in complex multi-frequency environments.*

**Keywords:** cognitive jamming, POMDP, unmanned aerial vehicle, electronic warfare, power optimization, SNR, BER, control channels, mathematical model, frequencies.

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Приймак С.О.**

<https://orcid.org/0009-0008-7532-6095>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кравчук С.О.**

<https://orcid.org/0000-0002-4118-0226>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИСОКОДОСТУПНОЇ VOIP СИСТЕМИ.

У статті розглянуто практичну реалізацію VoIP-систем (Voice over IP) підвищеної доступності, яка забезпечують голосовий зв'язок через IP-мережі. Наведено приклад практичної реалізації повної VoIP-системи, зокрема налаштування та тестування основних компонентів для забезпечення безперервності сервісу, відмовостійкості, масштабованості та ефективності використання ресурсів.

Запропонований метод практичної реалізації VoIP-системи базується на використанні безкоштовного програмного забезпечення Kamailio (сервер сигналізації SIP), RTPengine (обробка медіа-трафіку) та Redis (швидкісна база даних для зберігання RTP-транзакцій). Всі компоненти базуються на платформі Linux. Реалізована архітектура включає механізми автоматичного резервування серверів сигналізації та медіа-шлюзів за допомогою протоколу VRRP, балансування навантаження та безшовного перемикавання на резервні вузли у разі відмови одного або декількох компонентів.

Це суттєво відрізняється від традиційних підходів, де відмова одного з ключових елементів (сервер сигналізації або медіа-шлюз) призводить до негайного завершення всіх активних з'єднань.

Виконано експериментальне моделювання роботи системи, яке підтвердило її високу ефективність: навіть у разі відмови 50% компонентів система зберігає працездатність і не перериває активні голосові виклики.

Отримані результати можуть бути корисними для розробників і операторів VoIP-мереж, операторів стільникового зв'язку, а також підприємств, які використовують IP-телефонію для критично важливих комунікацій. Запропонований підхід до реалізації системи дозволяє мінімізувати ризики переривання зв'язку, підвищити якість обслуговування користувачів і забезпечити високу надійність роботи VoIP-сервісів.

**Ключові слова:** VoIP система, SIP, Kamailio, RTP, VRRP, висока доступність, надійність.

**Постановка проблеми.** Практика експлуатації VoIP-інфраструктур свідчить, що навіть короткочасна відмова сигнального або медіа-вузла може призвести до:

- повної втрати сервісу;
- розриву активних голосових з'єднань;
- неможливості реєстрації абонентських пристроїв;
- зниження якості обслуговування (QoS) та довіри користувачів.

Наукова проблема, що розглядається у статті, формулюється наступним чином:

необхідно розробити та практично реалізувати архітектуру високодоступної VoIP-системи, яка

забезпечує безперервну роботу SIP-сигналізації та RTP-медіапотоків у разі відмови одного або декількох вузлів системи, із мінімальним часом перемикавання та без втрати функціональності.

Для розв'язання зазначеної проблеми необхідно вирішити такі завдання:

- організувати резервування сигнальних серверів SIP;
- забезпечити синхронізацію реєстрацій та сигнального стану між вузлами;
- реалізувати відмовостійку обробку RTP-трафіку;
- мінімізувати вплив відмов на активні голосові з'єднання;



– використати відкриті програмні засоби з можливістю масштабування.

У зв'язку з цим актуальним є завдання розробки та впровадження високодоступних (High Availability, HA) VoIP-систем, здатних забезпечувати безперервну роботу сервісу навіть у разі відмови окремих компонентів.

Об'єктом дослідження у даній роботі є процеси забезпечення відмовостійкості та високої доступності VoIP-систем у IP-мережах.

Предметом дослідження є методи, механізми та архітектурні рішення побудови високодоступної VoIP-системи з використанням відкритого програмного забезпечення. Традиційні VoIP-рішення базуються на централізованій архітектурі, у якій сигнальний сервер (SIP-сервер) та медіашлюз є єдиними точками обробки трафіку. Такий підхід характеризується наявністю єдиної точки відмови (Single Point of Failure), що є неприйнятним для систем, які надають критично важливі послуги.

Існуючі комерційні рішення високодоступних VoIP-систем є дорогими у впровадженні, закритими для модифікації та складними в інтеграції з іншими мережевими сервісами.

У той же час, відкриті програмні платформи, такі як Kamailio [1], RTPengine [2], Redis [3], Keepalived [4], надають широкі можливості для побудови гнучких та масштабованих систем, проте їх комплексне застосування потребує ретельного опрацювання та узгодження механізмів взаємодії.

Таким чином, існує науково-практична проблема, яка полягає у відсутності типових, перевірених на практиці архітектур високодоступних VoIP-систем, що базуються на відкритому програмному забезпеченні та забезпечують автоматичне перемикання при відмовах, збереження сигнального стану та безперервність передачі медіапотоків.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є підвищення надійності та доступності VoIP-систем шляхом розробки і впровадження високодоступної архітектури сигналізації та медіаобробки.

Дана робота є продовженням досліджень, які вже були опубліковані в [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [9] розглянуто приклад побудовання VoIP-системи з шифруванням голосового та сигнального трафіку в режимі реальному часі,

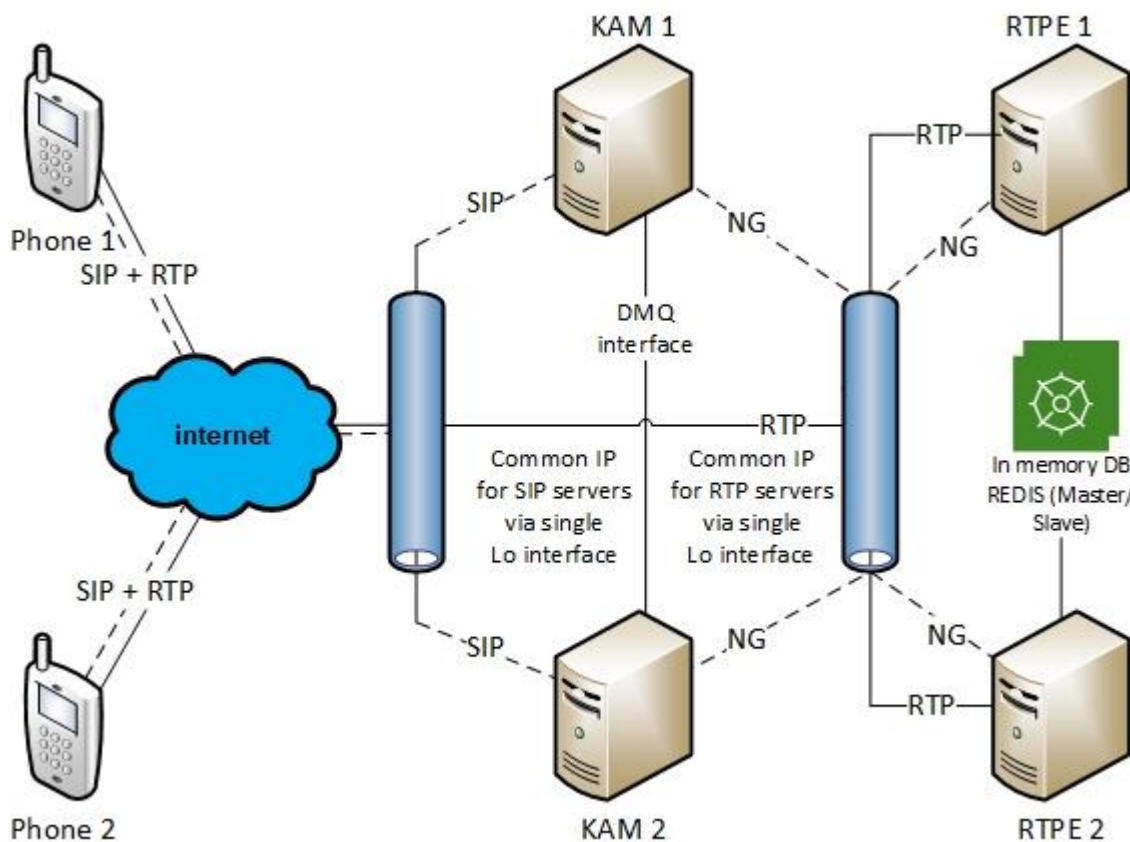


Рис.1. Схема високодоступної VoIP системи

в [10] приділено увагу побудуванню безпечної комп'ютерної мережі для VoIP-системи та наведені типові показники навантаги серверів VoIP, але в жодній з цих робіт не розглянуто аспекти стійкості до збою програмних та апаратних елементів VoIP-системи. В [11] розглянуто декілька методів підвищення доступності VoIP-системи, але жоден з них не виконує резервування існуючих голосових потоків RTP. У випадку реалізації запропонованої нами системи вплив на сервіси відсутній навіть при відмові 50 % її компонентів. Представляє інтерес для поліпшення VoIP-систем підходи на базі безкоштовного програмного забезпечення Kamailio, RTPengine та Redis, але у відомих роботах їх застосування недостатньо вивчене.

Завдання:

- Розробити архітектуру кластерної SIP-сигналізації на основі Kamailio.
- Реалізувати механізм синхронізації реєстрацій та стану викликів.
- Побудувати відмовостійкий кластер RTP-медіашлюзів.
- Забезпечити автоматичне перемикання між вузлами при відмовах.
- Провести практичну перевірку працездатності запропонованого рішення.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Теоретичні положення були викладені в [5] та [6]. Схема вискодоступної VoIP системи наведена на рис. 1.

## 1. Налаштування серверів сигналізації KAM1 та KAM2.

### 1.а. Налаштовуємо мережевий інтерфейс.

Для цього, в файл /etc/netplan/net.yaml вносимо наступні дані:

network:

```
version: 2
renderer: networkd
ethernets:
  enp0s3:
    dhcp4: false
```

|           |                          |           |                          |
|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|
| Для KAM1: | addresses: [10.0.2.4/24] | Для KAM2: | addresses: [10.0.2.5/24] |
|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|

```
nameservers:
  addresses:
    - 8.8.8.8
    - 8.8.4.4
  search: []
optional: true
routes:
  - to: default
    via: 10.0.2.1
    metric: 100

  - to: 10.20.20.2
    via: 10.0.2.10
    metric: 100
dummy-devices:
  lo0:
    addresses:
      - 10.20.20.1/32
```

Тут в лістингу:

- 10.0.2.4 – IP мережевого інтерфейса KAM1;
- 10.0.2.5 – IP мережевого інтерфейса KAM2;
- 8.8.8.8 та 8.8.4.4 – DNS сервера;
- 10.20.20.1 – адрес loopback інтерфейсів KAM1 та KAM2;
- 10.0.2.1 – IP шлюзу;
- 10.0.2.10 – “плаваючий” IP медіа шлюзів RTPe1 та RTPe2;
- 10.20.20.2 - адрес loopback інтерфейсів RTPe1 та RTPe2.

Для активації змін в конфігурації виконуємо команду:

```
# netplan apply
```

Результатом виводу повинна бути відсутність помилок.

1.6. Встановлюємо програмне забезпечення (ПЗ) для контролю працездатності вузлів КАМ1 та КАМ2:

```
# apt install sipsak
```

```
root@ip-172-31-82-47:/home/ubuntu# apt install sipsak
Reading package lists... Done
Building dependency tree... Done
Reading state information... Done
The following additional packages will be installed:
  libcares2
The following NEW packages will be installed:
  libcares2 sipsak
0 upgraded, 2 newly installed, 0 to remove and 18 not upgraded.
Need to get 125 kB of archives.
After this operation, 309 kB of additional disk space will be used.
Do you want to continue? [Y/n] y
Get:1 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble/main amd64 libcares2 amd64 1.27.0-1.0ubuntu1 [73.7 kB]
Get:2 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble/universe amd64 sipsak amd64 0.9.8.1-1build4 [50.9 kB]
Fetched 125 kB in 0s (1314 kB/s)
Selecting previously unselected package libcares2:amd64.
(Reading database ... 156180 files and directories currently installed.)
```

```
# apt install keepalived
```

```
root@ip-172-31-87-8:/home/ubuntu# apt install keepalived
Reading package lists... Done
Building dependency tree... Done
Reading state information... Done
The following additional packages will be installed:
  ipvsadm libsnmp-base libsnmp40t64
Suggested packages:
  heartbeat ldirectord snmp-mibs-downloader
The following NEW packages will be installed:
  ipvsadm keepalived libsnmp-base libsnmp40t64
0 upgraded, 4 newly installed, 0 to remove and 29 not upgraded.
Need to get 1772 kB of archives.
After this operation, 5941 kB of additional disk space will be used.
Do you want to continue? [Y/n] y
Get:1 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble-updates/main amd64 libsnmp-base all 5.9.4+dfsg-1.1ubuntu3.1 [206 kB]
Get:2 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble-updates/main amd64 libsnmp40t64 amd64 5.9.4+dfsg-1.1ubuntu3.1 [1066 kB]
Get:3 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble/main amd64 keepalived amd64 1:2.2.8-1build2 [460 kB]
Get:4 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble-updates/main amd64 ipvsadm amd64 1:1.31-1ubuntu0.1 [40.3 kB]
Fetched 1772 kB in 0s (14.3 MB/s)
Selecting previously unselected package libsnmp-base.
(Reading database ... 130443 files and directories currently installed.)
```

Та виконуємо їх налаштування. В файл /etc/keepalived/keepalived.conf вносимо наступні дані для КАМ1 та КАМ2:

```
vrrp_script check_sip {
    script "/etc/keepalived/checksip.sh"
    interval 1 # check every 2 seconds
    fall 2 # requires 2 failures for KO
    rise 2 # requires 2 successes for OK
    weight -60
}
bfd_instance kamalio {
```

Для КАМ1:

```
neighbor_ip 10.0.2.5 # remote_node_ip
source_ip 10.0.2.4 # local_ip
```

Для КАМ2:

```
neighbor_ip 10.0.2.4 # remote_node_ip
source_ip 10.0.2.5 # local_ip
```

```
}
```

```
vrrp_instance KAMAILIO {
```

```
    Для KAM1:
    state MASTER
    priority 150
```

```
    Для KAM1:
    state BACKUP
    priority 100
```

```
    interface enp0s3
    virtual_router_id 56
    advert_int 1
    authentication {
        auth_type PASS
        auth_pass somepassword
    }
    virtual_ipaddress {
        10.0.2.9/24 dev enp0s3
    }
```

```
    track_bfd {
        kamalio weight 60 reverse
    }
    track_script {
        check_sip
    }
}
```

Де в лістингу:

- 10.0.2.5 - IP мережевого інтерфейса KAM2
- 10.0.2.9 – “плаваючий” IP серверів сигналізації KAM1 та KAM2.

Створюємо командний файл та робимо його виконавчим:

```
# touch /etc/keepalived/checksip.sh
# chmod +x /etc/keepalived/checksip.sh
```

Результатом виводу повинна бути відсутність помилок.  
Та вносимо в нього наступні дані:

```
#!/bin/bash
```

```
node01=10.0.2.4
node02=10.0.2.5
```

```
Для KAM1:
return_code=0 # success
```

```
Для KAM2:
return_code=1 # fail
```

```
timeout 1 sipsak -s sip:$node01:5060
exit_status=$?
if [[ $exit_status -eq 0 ]]; then
    echo "sip ping successful to node01 [$node01]"
    exit $return_code
fi
```

```
timeout 2 sipsak -s sip:$node02:5060
exit_status=$?
if [[ $exit_status -eq 0 ]]; then
    echo "sip ping successful to node02 [$node02]"
```

```
    Для КАМ1:
    return_code=1
```

```
    Для КАМ2:
    return_code=0
```

```
fi
```

```
echo "return code [$return_code]"
exit $return_code
```

Далі виконуємо перезапуск утиліти keepalived з метою використання нею нових налаштувань:

```
# systemctl restart keepalived
```

Та перевіряємо статус:

```
# systemctl status keepalived
```

```
root@ip-172-31-87-8:/home/ubuntu# systemctl status keepalived
○ keepalived.service - Keepalive Daemon (LVS and VRRP)
   Loaded: loaded (/usr/lib/systemd/system/keepalived.service; enabled; preset: enabled)
   Active: inactive (dead)
     Condition: start active at Mon 2025-05-12 08:17:57 UTC; 3min 18s ago
               └─ ConditionFileNotEmpty=/etc/keepalived/keepalived.conf was not met
     Docs: man:keepalived(8)
           man:keepalived.conf(5)
           man:genhash(1)
           https://keepalived.org
```

1.в. Виконуємо інсталяцію сервера сигналізації Kamailio (КАМ1 та КАМ2).

Завантажуємо необхідне ПЗ для компіляції:

```
# apt install git-core gcc g++ flex bison make libssl-dev lua5.4 liblua5.4-dev libhiredis-dev
```

```
Scanning processes...
Scanning candidates...
Scanning linux images...

Pending kernel upgrade!
Running kernel version:
  6.8.0-1024-aws
Diagnostics:
  The currently running kernel version is not the expected kernel version 6.8.0-1027-aws.

Restarting the system to load the new kernel will not be handled automatically, so you should consider rebooting.

Restarting services...

Service restarts being deferred:
  /etc/needrestart/restart.d/dbus.service
systemctl restart networkd-dispatcher.service
systemctl restart systemd-logind.service
systemctl restart unattended-upgrades.service

No containers need to be restarted.

User sessions running outdated binaries:
ubuntu @ session #1: sshd[1031]
ubuntu @ user manager service: systemd[1378]

No VM guests are running outdated hypervisor (qemu) binaries on this host.
```

```
root@ip-172-31-87-8:/home/ubuntu# wget http://www.kamailio.org/pub/kamailio/latest-6.0.x/src/kamailio-6.0.1_src.tar.gz
--2025-05-12 08:28:27-- http://www.kamailio.org/pub/kamailio/latest-6.0.x/src/kamailio-6.0.1_src.tar.gz
Resolving www.kamailio.org (www.kamailio.org)... 193.22.119.66, 2a00:d60:0:400::2
Connecting to www.kamailio.org (www.kamailio.org)|193.22.119.66|:80... connected.
HTTP request sent, awaiting response... 200 OK
Length: 13064707 (12M) [application/x-gzip]
Saving to: 'kamailio-6.0.1_src.tar.gz'

kamailio-6.0.1_src.tar.gz                               100%[=====]

2025-05-12 08:29:01 (379 KB/s) - 'kamailio-6.0.1_src.tar.gz' saved [13064707/13064707]

root@ip-172-31-87-8:/home/ubuntu#
```

```
kamailio-6.0.1/src/modules/rtimer/doc/  
kamailio-6.0.1/src/modules/rtimer/doc/rtimer_admin.xml  
kamailio-6.0.1/src/modules/rtimer/doc/rtimer.xml  
kamailio-6.0.1/src/modules/rtimer/doc/Makefile  
kamailio-6.0.1/src/modules/rtimer/README  
kamailio-6.0.1/src/modules/rtimer/rtimer_mod.c  
kamailio-6.0.1/src/modules/rtimer/CMakeLists.txt  
kamailio-6.0.1/src/modules/rtimer/Makefile  
kamailio-6.0.1/src/Makefile.utils  
kamailio-6.0.1/src/Makefile.vars  
kamailio-6.0.1/src/Makefile  
root@ip-172-31-87-8:/home/ubuntu#
```

```
# cd kamailio-6.0.1 && make cfg
```

```
root@ip-172-31-87-8:/home/ubuntu/kamailio-6.0.1# make cfg
make -C src/ cfg
make[1]: Entering directory '/home/ubuntu/kamailio-6.0.1/src'
target architecture <x86_64>, host architecture <x86_64>
making config...
rm -f modules.lst
make --no-print-directory modules.lst
saving modules list...
make[1]: Leaving directory '/home/ubuntu/kamailio-6.0.1/src'
```

Для цього редагуємо строку `include modules` в файлі `src/modules.lst`:

```
include modules = dmq ndb redis app lua
```

Виконуємо компіляцію програми:

```
# make all && make install
```

[illegible]



Виконуємо запуск Kamailio та перевіряємо статус:

```
# systemctl start kamailio
# systemctl status kamailio
```

```
* kamailio.service - kamailio - the Open Source SIP Server
   Loaded: loaded (/etc/systemd/system/kamailio.service; enabled; preset: enabled)
   Active: active (running) since Sat 2025-05-10 11:18:25 UTC; 1 day 21h ago
     Process: 2737 ExecStart=/usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f $CFGFILE -m $SHM_MEMORY -M $PKG_MEMORY --atexit=no
    Main PID: 2740 (kamailio)
      Tasks: 25 (limit: 1129)
     Memory: 32.0M (peak: 32.2M)
        CPU: 2min 13.260s
    CGroup: /system.slice/kamailio.service
            ┌─2740 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2741 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            ┌─2742 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2743 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            ┌─2744 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2745 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            ┌─2746 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2747 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            ┌─2748 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2749 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            ┌─2750 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2751 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
```

1.г. Виконуємо налаштування серверів сигналізації KAM1 та KAM2.

Для цього редагуємо конфігураційний файл `/usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg` та налаштовуємо IP адреси, на яких буде проходить обмін сигнальними повідомленнями SIP:

Для KAM1:

```
listen=udp:10.0.2.4:5060
listen=udp:10.0.2.4:5062
```

Для KAM2:

```
listen=udp:10.0.2.5:5060
listen=udp:10.0.2.5:5062
```

Для KAM1 та KAM2:

```
listen=udp:10.20.20.1:5060
advertised_address="10.20.20.1"
```

В секції `loadmodule` підгружаємо додаткові внутрішні модулі:

```
loadmodule "dmq.so"
loadmodule "dmq_usrloc.so"
loadmodule "htable.so"
loadmodule "rtppengine.so"
loadmodule "sd pops.so"
loadmodule "auth.so"
loadmodule "dmq_usrloc.so"
loadmodule "ipops.so"
loadmodule "ndb_redis.so"
```

Та в секції `modparam` виконуємо їх налаштування.

Реплікація сигнальних повідомлень між серверами

Для KAM1:

```
modparam("dmq", "server_address", "sip:10.0.2.:5062")
modparam("dmq", "notification_address", "sip:10.0.2.5:5062")
```

Для KAM2:

```
modparam("dmq", "server_address", "sip:10.0.2.5:5062")
modparam("dmq", "notification_address", "sip:10.0.2.4:5062")
```



Для KAM1 та KAM2:

```
modparam("dmq", "multi_notify", 1)
modparam("dmq", "num_workers", 4)
modparam("dmq", "ping_interval", 15)
modparam("dmq_usrloc", "enable", 1)
modparam("htable", "enable_dmq", 1)
modparam("htable", "dmq_init_sync", 1)
```

Активация модуля обработки голосового трафика RTP

```
modparam("rtpengine", "rtpengine_sock", "udp:10.20.20.2:2223")
```

Налаштування серверів KAM1 та KAM2 на роботу з БД Redis для маршрутизації голосових викликів і реєстрації користувачів:

```
modparam("ndb_redis", "server", "name=MyRedisServer;addr=10.0.2.15;port=6379;db=3")
modparam("ndb_redis", "server", "name=RedisUser;addr=10.0.2.15;port=6379;db=4")
modparam("ndb_redis", "init_without_redis", 1)
```

Завдамо логіку опрацювання аутентифікації користувача та реєстрації в системі з наступною реплікацією даних на резервний сервер. Для цього в розділ request\_route додамо наступне:

```
if (method == "REGISTER") {
    redis_cmd("RedisUser", "HMGET $fU password", "r");
    if (!pv_www_authenticate("$fd", "$redis(r=>value[0])", "0")) {
        auth_challenge("$fd", "1");
        exit;
    }
    route(REGISTRAR);
    dmq_t_replicate();
    exit;
}
if ($rm == "KDMQ" && $rp == 5062) {
    dmq_handle_message();
    exit;
}
```

Додаємо блок маршрутизації голосових викликів:

```
if (is_method("INVITE|SUBSCRIBE")) {
    if (has_body("application/sdp")) {
        sdp_keep_codecs_by_name("PCMA,PCMU,telephone-event");
        if(!msg_apply_changes()){
            xlog("Error changing codecs.....");
        }
        if(!lookup("location")) {
            $var(j) = ${rU{s.len}};
            $var(s) = "";
            $avp(dst_IP) = "";
            while($var(j) >= 3) {
                $var(s) = ${rU{s.substr, 0, $var(j)}};
                redis_cmd("MyRedisServer", "GET $var(s)", "r");
                $avp(dst_IP) = $redis(r=>value);
                if( is_ip($avp(dst_IP)) && $avp(dst_IP) != "") {
                    $rd = $avp(dst_IP);
                    xlog("Value of Dst_IP is: $avp(dst_IP)");
                }
            }
        }
    }
}
```

```

        redis_free("r");
        break;
    }
    $var(j) = $var(j) - 1;
}
if($avp(dst_IP) == "") {
    xlog("Dst_IP not found or incorrect!");
    sl_send_reply("404", "Not Found");
}
}
}
record_route();
}

```

Активуємо логіку обробки голосових пакетів RTP. В функції route[RELAY] та onreply\_route[MANAGE\_REPLY] додаєм наступний код:

```

if (has_body("application/sdp")) {
    rtpengine_manage("replace-origin replace-session-connection");
}

```

1.д. Виконуємо перезапуск ПЗ Kamailio з метою активації вищенаведених налаштувань та перевірку статусу роботи програми.

```
# systemctl restart kamailio
```

Результатом виводу повинна бути відсутність помилок.

```
# systemctl status kamailio
```

```

* kamailio.service - kamailio - the Open Source SIP Server
   Loaded: loaded (/etc/systemd/system/kamailio.service; enabled; preset: enabled)
   Active: active (running) since Sat 2025-05-10 11:18:25 UTC; 1 day 21h ago
     Process: 2737 ExecStart=/usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f $CFGFILE -m $SHM_MEMORY -M $PKG_MEMORY --atexit=no
    Main PID: 2740 (kamailio)
      Tasks: 25 (limit: 1129)
     Memory: 32.0M (peak: 32.2M)
        CPU: 2min 13.260s
    CGroup: /system.slice/kamailio.service
            └─2740 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2741 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2742 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2743 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2744 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2745 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2746 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2747 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2748 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2749 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2750 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no
            └─2751 /usr/local/sbin/kamailio -P /run/kamailio/kamailio.pid -f /usr/local/etc/kamailio/kamailio.cfg -m 64 -M 8 --atexit=no

```

На цьому налаштування сигнальних серверів KAM1 та KAM2 можна вважати завершеним.

2. Встановлення та налаштування медіа серверів RTP1 та RTP2.

2.а. Налаштовуємо мережевий інтерфейс.

Для цього, в файл /etc/netplan/net.yaml вносимо наступні дані:

```

network:
  version: 2
  renderer: networkd
  ethernet:
    enp0s3:
      dhcp4: false

```

Для RTPE1:

addresses: [10.0.2.11/24]

Для RTPE2:

addresses: [10.0.2.12/24]

nameservers:

addresses:

- 8.8.8.8

- 8.8.4.4

search: []

optional: true

routes:

- to: default

via: 10.0.2.1

metric: 100

dummy-devices:

lo0:

addresses:

- 10.20.20.2/32

Де у лістингу:

- 10.0.2.11 – IP мережевого інтерфейса RTPE1;
- 10.0.2.12 – IP мережевого інтерфейса RTPE2;
- 8.8.8.8 та 8.8.4.4 – DNS сервера;
- 10.20.20.2 – адреса loopback інтерфейсів RTPE1 та RTPE2;
- 10.0.2.1 – IP шлюз;
- 10.0.2.10 – “плаваючий” IP медіа шлюзів RTPE1 та RTPE2;

Для активації змін в конфігурації виконуємо команду:

```
# netplan apply
```

Результатом виводу повинна бути відсутність помилок.

2.6. Встановлюємо програмне забезпечення keepalived для контролю працездатності вузлів RTPE1 та RTPE2:

```
# apt install keepalived
```

```
root@ip-172-31-87-8:/home/ubuntu# apt install keepalived
Reading package lists... Done
Building dependency tree... Done
Reading state information... Done
The following additional packages will be installed:
  ipvsadm libsnmp-base libsnmp40t64
Suggested packages:
  heartbeat ldirectord snmp-mibs-downloader
The following NEW packages will be installed:
  ipvsadm keepalived libsnmp-base libsnmp40t64
0 upgraded, 4 newly installed, 0 to remove and 29 not upgraded.
Need to get 1772 kB of archives.
After this operation, 5941 kB of additional disk space will be used.
Do you want to continue? [Y/n] y
Get:1 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble-updates/main amd64 libsnmp-base all 5.9.4+dfsg-1.1ubuntu3.1 [206 kB]
Get:2 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble-updates/main amd64 libsnmp40t64 amd64 5.9.4+dfsg-1.1ubuntu3.1 [1066 kB]
Get:3 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble/main amd64 keepalived amd64 1:2.2.8-1build2 [460 kB]
Get:4 http://us-east-1.ec2.archive.ubuntu.com/ubuntu noble-updates/main amd64 ipvsadm amd64 1:1.31-1ubuntu0.1 [40.3 kB]
Fetched 1772 kB in 0s (14.3 MB/s)
Selecting previously unselected package libsnmp-base.
(Reading database ... 130443 files and directories currently installed.)
```

Та виконуємо їх налаштування. В файл /etc/keepalived/keepalived.conf вносимо наступні дані для RTPE1:

```

vrrp_script check_rtpengine {
    script "/etc/keepalived/checkrtpengine.sh"
    interval 1 # check every 2 seconds
    fall 2 # requires 2 failures for KO
    rise 2 # requires 2 successes for OK
    weight -60
}

#define BFD session
bfd_instance rtpengine {
    neighbor_ip 10.0.2.12 # remote_node_ip
    source_ip 10.0.2.11 # local_ip
}

vrrp_instance RTPENGINE_1 {
    state MASTER
    interface enp0s3
    virtual_router_id 57
    priority 150
    #nopreempt
    advert_int 1
    authentication {
        auth_type PASS
        auth_pass somepassword
    }

    virtual_ipaddress {
        10.0.2.10/24 dev enp0s3
    }

    #add bfd tracking
    track_bfd {
        rtpengine weight 60 reverse
    }

    track_script {
        check_rtpengine
    }
}

```

Де у лістингу 10.0.2.10 – “віртуальний” IP серверів сигналізації RTPENGINE1 та RTPENGINE2.

Відповідно файл checkrtpengine.sh містить дані:

```

#!/bin/bash

node01=10.0.2.11
node02=10.0.2.12
port=2225
return_code=0 # success

# check local instance
timeout 1 nc -z $node01 $port > /dev/null 2>&1
exit_status=$?
if [[ $exit_status -eq 0 ]]; then
    echo "sip ping successful to node01 [$node01]"
    exit $return_code
fi

```

```
# check remote instance
timeout 2 nc -z $node02 $port > /dev/null 2>&1
exit_status=$?
if [[ $exit_status -eq 0 ]]; then
    echo "sip ping successful to node02 [$node02]"
    return_code=1
fi

echo "return code [$return_code]"

exit $return_code
```

Переходимо до налаштування RTPENGINE. В файл /etc/keepalived/keepalived.conf вносимо наступні дані:

```
vrrp_script check_rtpengine {
    script "/etc/keepalived/checksip.sh"
    interval 1 # check every 2 seconds
    fall 2 # requires 2 failures for KO
    rise 2 # requires 2 successes for OK
    weight -60
}

#define BFD session
bfd_instance rtpengine {
    neighbor_ip 10.0.2.11 # remote_node_ip
    source_ip 10.0.2.12 # local_ip
}

vrrp_instance RTPENGINE_2 {
    state BACKUP
    interface enp0s3
    virtual_router_id 57
    priority 100
    #nopreempt
    advert_int 1
    authentication {
        auth_type PASS
        auth_pass somepassword
    }

    virtual_ipaddress {
        10.0.2.10/24 dev enp0s3
    }

    #add bfd tracking
    track_bfd {
        rtpengine weight 60 reverse
    }

    track_script {
        check_rtpengine
    }
}
```

Відповідно в checkrtpengine.sh вносимо наступне:

```
#!/bin/bash
```

```

node01=10.0.2.11
node02=10.0.2.12
port=2225
return_code=1 # fail

# check remote instance fist
timeout 1 nc -z $node01 $port > /dev/null 2>&1
exit_status=$?
if [[ $exit_status -eq 0 ]]; then
    echo "ping successful to node01 [$node01]"
    exit $return_code
fi

# remote instance failed, check local
timeout 2 nc -z $node02 $port > /dev/null 2>&1
exit_status=$?
if [[ $exit_status -eq 0 ]]; then
    echo "ping successful to node02 [$node02]"
    return_code=0
fi

echo "return code [$return_code]"

exit $return_code

```

На обох серверах RTPE1 та RTPE2 робимо файл checkrtpe.sh виконавчим:

```
# chmod +x /etc/keepalived/checkrtpe.sh
```

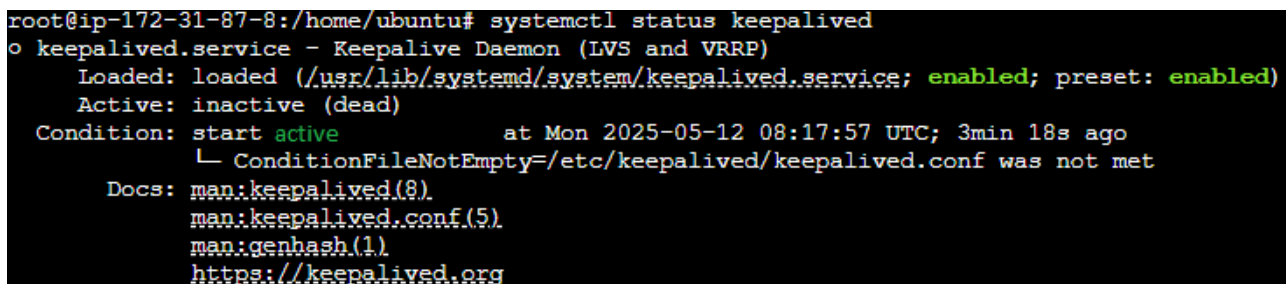
Результатом виводу повинна бути відсутність помилок.

Далі виконуємо перезапуск утиліти keepalived на обох серверах RTPE1 та RTPE2 з метою викорис-  
тання нею нових налаштувань:

```

# systemctl restart keepalived
Та перевіряємо статус:
# systemctl status keepalived

```



```

root@ip-172-31-87-8:/home/ubuntu# systemctl status keepalived
● keepalived.service - Keepalive Daemon (LVS and VRRP)
   Loaded: loaded (/usr/lib/systemd/system/keepalived.service; enabled; preset: enabled)
   Active: inactive (dead)
     Condition: start active at Mon 2025-05-12 08:17:57 UTC; 3min 18s ago
               └─ ConditionFileNotEmpty=/etc/keepalived/keepalived.conf was not met
     Docs: man:keepalived(8)
           man:keepalived.conf(5)
           man:genhash(1)
           https://keepalived.org

```

В разі успіху маємо результат як на рисунку вище.

2.в. Встановлення ПЗ RTPengine.

Процедура виконання є аналогічною для серверів RTPE1 та RTPE2.

Завантажуємо допоміжні модулі:

```

# apt install -y build-essential git dpkg-dev debhelper libxtables-dev linux-headers-$(uname
-r) mc libevent-dev libcurl4-openssl-dev libpcap-dev libhiredis-dev libglib2.0-dev libpcre3-dev
libavcodec-dev libavformat-dev libavutil-dev libswresample-dev libnetfilter-queue-dev libjson-
glib-dev libbcg729-dev markdown libspandsp-dev libavfilter-dev libbencode-perl libcrypt-

```

openssl-rsa-perl libdigest-crc-perl libdigest-hmac-perl libnet-interface-perl libxmlrpc-core-c3-dev net-tools pkg-config unzip zlib1g-dev libssl-dev

```
Processing triggers for libgdk-pixbuf-2.0-0:amd64 (2.42.10+dfsg-3ubuntu3.1) ...
Scanning processes...
Scanning candidates...
Scanning linux images...

Pending kernel upgrade!
Running kernel version:
  6.8.0-1024-aws
Diagnostics:
  The currently running kernel version is not the expected kernel version 6.8.0-1028-aws.

Restarting the system to load the new kernel will not be handled automatically, so you should consider rebooting.

Restarting services...

Service restarts being deferred:
  /etc/needrestart/restart.d/dbus.service
systemctl restart networkd-dispatcher.service
systemctl restart systemd-logind.service
systemctl restart unattended-upgrades.service

No containers need to be restarted.

No user sessions are running outdated binaries.

No VM guests are running outdated hypervisor (qemu) binaries on this host.
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu#
```

Загружаємо ПЗ RTPengine з репозиторію git:

```
# git clone https://github.com/sipwise/rtpengine.git
```

```
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu# git clone https://github.com/sipwise/rtpengine.git
Cloning into 'rtpengine'...
remote: Enumerating objects: 51303, done.
remote: Counting objects: 100% (935/935), done.
remote: Compressing objects: 100% (332/332), done.
remote: Total 51303 (delta 790), reused 686 (delta 599), pack-reused 50368 (from 3)
Receiving objects: 100% (51303/51303), 31.22 MiB | 30.59 MiB/s, done.
Resolving deltas: 100% (41110/41110), done.
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu#
```

Заходимо в директорію та компілюємо модуль ядра RTPengine:

```
# cd rtpengine/kernel-module && make && make install
```

```
/home/ubuntu/rtpengine/kernel-module/gen-rtpengine-kmod-flags >/home/ubuntu/rtpengine/kernel-module/rtpengine-kmod.mk
make -C /lib/modules/6.8.0-1024-aws/build M=/home/ubuntu/rtpengine/kernel-module O=/lib/modules/6.8.0-1024-aws/build modules
make[1]: Entering directory '/usr/src/linux-headers-6.8.0-1024-aws'
warning: the compiler differs from the one used to build the kernel
The kernel was built by: x86_64-linux-gnu-gcc-13 (Ubuntu 13.3.0-6ubuntu2-24.04) 13.3.0
You are using:      gcc-13 (Ubuntu 13.3.0-6ubuntu2-24.04) 13.3.0
CC [M] /home/ubuntu/rtpengine/kernel-module/xt_RTPENGINE.o
MODPOST /home/ubuntu/rtpengine/kernel-module/Module.symvers
CC [M] /home/ubuntu/rtpengine/kernel-module/xt_RTPENGINE.mod.o
LD [M] /home/ubuntu/rtpengine/kernel-module/xt_RTPENGINE.ko
BTF [M] /home/ubuntu/rtpengine/kernel-module/xt_RTPENGINE.ko
Skipping BTF generation for /home/ubuntu/rtpengine/kernel-module/xt_RTPENGINE.ko due to unavailability of vmlinux
make[1]: Leaving directory '/usr/src/linux-headers-6.8.0-1024-aws'
install -D xt_RTPENGINE.ko /lib/modules/6.8.0-1024-aws/updates/xt_RTPENGINE.ko
depmod -a
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu/rtpengine/kernel-module#
```

Завантажуємо модуль ядра RTPengine та перевіряємо його статус:

```
modprobe xt_RTPENGINE && lsmod | grep RTPENGINE
```

```
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu/rtpengine/kernel-module# lsmod | grep RTPENGINE
xt_RTPENGINE          94208  0
x_tables              65536  2 xt_RTPENGINE,ip_tables
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu/rtpengine/kernel-module#
```

Компілюємо підсистему користувача:



```
# cd .. && dpkg-buildpackage -b -us -uc
```

```
Renaming ngcp-rtpengine-perftest-dbqaya 13.4.0.0+0~mr13.4.0.0_amd64.deb to ngcp-rtpengine-perftest-dbqaya 13.4.0.0+0~mr13.4.0.0_amd64.ddeb
dpkg-deb: building package 'ngcp-rtpengine-perftest-data' in './ngcp-rtpengine-perftest-data_13.4.0.0+0~mr13.4.0.0_all.deb'.
dpkg-genbuildinfo --build-binary -O./ngcp-rtpengine 13.4.0.0+0~mr13.4.0.0_amd64.buildinfo
dpkg-genchanges --build-binary -O./ngcp-rtpengine 13.4.0.0+0~mr13.4.0.0_amd64.changes
dpkg-genchanges: info: binary-only upload (no source code included)
dpkg-source --after-build
dpkg-source: info: using options from rtpengine/debian/source/options: --extend-diff-ignore=.gitreview
dpkg-buildpackage: info: binary-only upload (no source included)
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu/rtpengine#
```

Виконуємо установку підсистеми користувача:

```
# cd ..
# dpkg -i ngcp-rtpengine-*.deb
```

```
Setting up ngcp-rtpengine-perftest-data (13.4.0.0+0~mr13.4.0.0) ...
Setting up ngcp-rtpengine-perftest (13.4.0.0+0~mr13.4.0.0) ...
Setting up ngcp-rtpengine-recording-daemon (13.4.0.0+0~mr13.4.0.0) ...
Setting up ngcp-rtpengine-utils (13.4.0.0+0~mr13.4.0.0) ...
Processing triggers for man-db (2.12.0-4build2) ...
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu#
```

Виконуємо налаштування конфігурації.

для RTPЕ1 в файл /etc/rtpengine/rtpengine.conf вносимо наступні правки:

```
[rtpengine]
table = 0
interface = pub1/10.20.20.2;pub2/10.0.2.12
listen-ng = 10.20.20.2:2223
listen-http = 10.0.2.11:2225
listen-cli = localhost:2224
```

```
timeout = 60
silent-timeout = 3600
tos = 184
port-min = 30000
port-max = 40000
redis = 10.0.2.13:6379/1
subscribe-keyspace=2
redis-num-threads = 8
no-redis-required = true
redis-expires = 86400
redis-allowed-errors = -1
redis-disable-time = 10
redis-cmd-timeout = 0
redis-connect-timeout = 1000
```

для RTPЕ2 в файл /etc/rtpengine/rtpengine.conf вносимо наступні правки:

```
[rtpengine]
table = 0
interface = pub1/10.20.20.2;pub2/10.0.2.11
listen-ng = 10.20.20.2:2223
listen-http = 10.0.2.12:2225
listen-cli = localhost:2224
timeout = 60
silent-timeout = 3600
tos = 184
port-min = 30000
port-max = 40000
redis = 10.0.2.13:6379/2
subscribe-keyspace=1
redis-num-threads = 8
```

```
no-redis-required = true
redis-expires = 86400
redis-allowed-errors = -1
redis-disable-time = 10
redis-cmd-timeout = 0
redis-connect-timeout = 1000
```

Виконуємо запуск підсистеми користувача:

```
# systemctl daemon-reload
# systemctl enable rtpengine
# systemctl start rtpengine
# systemctl status rtpengine
```

```
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu# systemctl daemon-reload
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu# systemctl enable rtpengine
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu# systemctl start rtpengine
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu# systemctl status rtpengine
• ngcp-rtpengine-daemon.service - NGCP RTP/media Proxy Daemon
   Loaded: loaded (/usr/lib/systemd/system/ngcp-rtpengine-daemon.service; enabled; preset: enabled)
   Active: active (running) since Wed 2025-05-14 13:28:57 UTC; 1min 25s ago
     Main PID: 34956 (rtpengine)
        Tasks: 25 (limit: 1129)
      Memory: 18.8M (peak: 19.1M)
         CPU: 157ms
    CGroup: /system.slice/ngcp-rtpengine-daemon.service
            └─34956 /usr/bin/rtpengine -f -E --no-log-timestamps --pidfile /run/rtpengine/ngcp-rtpengine-daemon.pid --config-file /

May 14 13:28:56 ip-172-31-82-243 systemd[1]: Starting ngcp-rtpengine-daemon.service - NGCP RTP/media Proxy Daemon...
May 14 13:28:57 ip-172-31-82-243 rtpengine[34956]: INFO: [core] compile-time OpenSSL library: OpenSSL 3.0.13 30 Jan 2024
May 14 13:28:57 ip-172-31-82-243 rtpengine[34956]: INFO: [core] run-time OpenSSL library: OpenSSL 3.0.13 30 Jan 2024
May 14 13:28:57 ip-172-31-82-243 rtpengine[34956]: INFO: [crypto] Generating new DTLS certificate
May 14 13:28:57 ip-172-31-82-243 rtpengine[34956]: INFO: [core] Startup complete, version 13.4.0.0+0-mr13.4.0.0 git-master-76dd9ab5
May 14 13:28:57 ip-172-31-82-243 systemd[1]: Started ngcp-rtpengine-daemon.service - NGCP RTP/media Proxy Daemon.
May 14 13:28:57 ip-172-31-82-243 rtpengine[34956]: INFO: [http] Websocket listener thread running
root@ip-172-31-82-243:/home/ubuntu#
```

### 3. Встановлення in-memory DB Redis

#### 3.a. Налаштовуємо мережевий інтерфейс.

Для цього, в файл /etc/netplan/net.yaml вносимо наступні дані:

```
network:
  version: 2
  ethernet:
    enp0s3:
      dhcp4: false
      addresses: [10.0.2.15/24]
      nameservers:
        addresses:
          - 8.8.8.8
          - 8.8.4.4
        search: []
      optional: true

  routes:
    - to: default
      via: 10.0.2.1
      metric: 100
```

Де у лістингу:

- 10.0.2.15 – IP адреса серверу Redis
- 10.0.2.1 – IP адреса шлюзу.

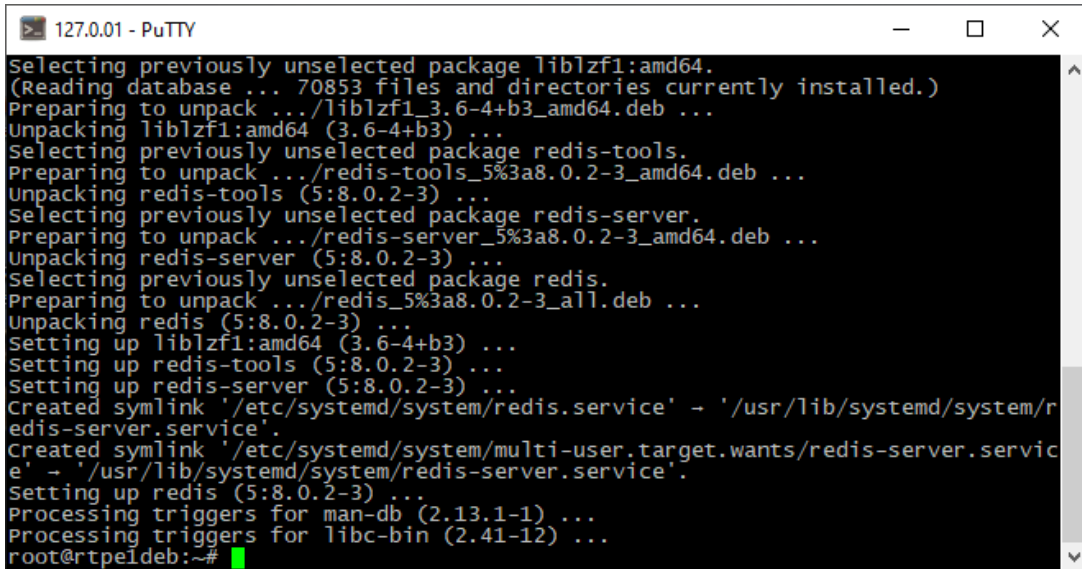
Для активації змін в конфігурації виконуємо команду:

```
# netplan apply
```

Результатом виводу повинна бути відсутність помилок.

### 3.6. Встановлюємо in-memory DB Redis:

```
# apt install redis
```



```
127.0.01 - PuTTY
Selecting previously unselected package liblzfl:amd64.
(Reading database ... 70853 files and directories currently installed.)
Preparing to unpack .../liblzfl_3.6-4+b3_amd64.deb ...
Unpacking liblzfl:amd64 (3.6-4+b3) ...
Selecting previously unselected package redis-tools.
Preparing to unpack .../redis-tools_5%3a8.0.2-3_amd64.deb ...
Unpacking redis-tools (5:8.0.2-3) ...
Selecting previously unselected package redis-server.
Preparing to unpack .../redis-server_5%3a8.0.2-3_amd64.deb ...
Unpacking redis-server (5:8.0.2-3) ...
Selecting previously unselected package redis.
Preparing to unpack .../redis_5%3a8.0.2-3_all.deb ...
Unpacking redis (5:8.0.2-3) ...
Setting up liblzfl:amd64 (3.6-4+b3) ...
Setting up redis-tools (5:8.0.2-3) ...
Setting up redis-server (5:8.0.2-3) ...
Created symlink '/etc/systemd/system/redis.service' -> '/usr/lib/systemd/system/redis-server.service'.
Created symlink '/etc/systemd/system/multi-user.target.wants/redis-server.service' -> '/usr/lib/systemd/system/redis-server.service'.
Setting up redis (5:8.0.2-3) ...
Processing triggers for man-db (2.13.1-1) ...
Processing triggers for libc-bin (2.41-12) ...
root@rtpe1deb:~#
```

Вносимо правки в конфігураційний файл /etc/redis/redis.conf:

```
...
bind 10.0.2.15
notify-keyspace-events AKE
...
```

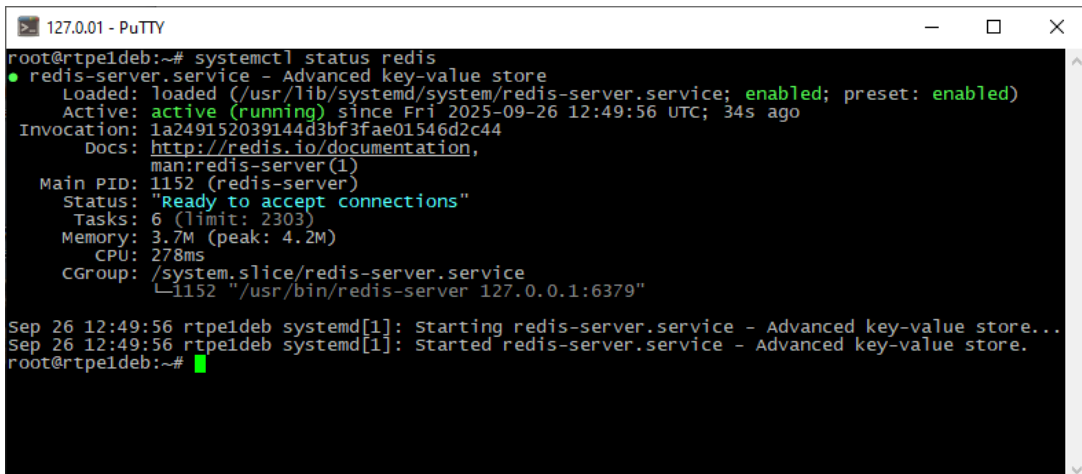
Виконуємо перезавантаження Redis:

```
# systemctl restart redis
```

Виконуємо перевірку статусу роботи Redis:

```
# systemctl status redis
```

У разі успіху результат буде виглядати як на зазначено нижче:



```
127.0.01 - PuTTY
root@rtpe1deb:~# systemctl status redis
● redis-server.service - Advanced key-value store
   Loaded: loaded (/usr/lib/systemd/system/redis-server.service; enabled; preset: enabled)
   Active: active (running) since Fri 2025-09-26 12:49:56 UTC; 34s ago
   Invocation: 1a249152039144d3bf3fae01546d2c44
     Docs: http://redis.io/documentation,
           man:redis-server(1)
  Main PID: 1152 (redis-server)
    Status: "Ready to accept connections"
     Tasks: 6 (limit: 2303)
  Memory: 3.7M (peak: 4.2M)
     CPU: 278ms
   CGroup: /system.slice/redis-server.service
           └─1152 /usr/bin/redis-server 127.0.0.1:6379"

Sep 26 12:49:56 rtpe1deb systemd[1]: Starting redis-server.service - Advanced key-value store...
Sep 26 12:49:56 rtpe1deb systemd[1]: Started redis-server.service - Advanced key-value store.
root@rtpe1deb:~#
```

**Результати виконання поставленої задачі.**

Об'єктом дослідження є проведення двох експериментів:

**А.** Збереження голосового виклику та його коректне опрацювання після програмного або апаратного збою сигнального сервера КАМ1, який керує цим викликом.

**Б.** Збереження голосового виклику та його коректне опрацювання після програмного або апаратного збою медіа шлюза RTPЕ1, який опрацьовує голосовий потік.

Суть проведення експерименту *А* в наступному:

1) абонент Phone1 здійснює виклик абонента Phone2 в системі, наведеній на рис. 2;

2) після успішного встановлення з'єднання між цими абонентами ми штучно вносимо відмову сигнального серверу КАМ1, власне вимикаємо віртуальний комп'ютер;

3) оскільки всі SIP-транзакції “віддзеркалюються” в сигнальному сервері КАМ2, а ПЗ Кеераліве впроваджує коректний статус сигнального сервера (в даному випадку КАМ2 змінює свій статус з резервного на основний) та продовжує керувати всіма транзакціями, раніше отриманими від КАМ1;

4) в разі отримання сервером КАМ2 сигнальних повідомлень в рамках SIP-транзакції, яка була створена КАМ1, КАМ2 відшукує цю транзакцію у власній БД та продовжує обробляти цей виклик.

Сигнальний трейс голосового виклику описаного вище, наведено на рис. 3, момент відповіді сигнального серверу КАМ2 позначено міткою [takeover].

Суть проведення експерименту *Б* в наступному:

1) абонент Phone1 здійснює виклик абонента Phone2 в системі, наведеній на рис. 2;

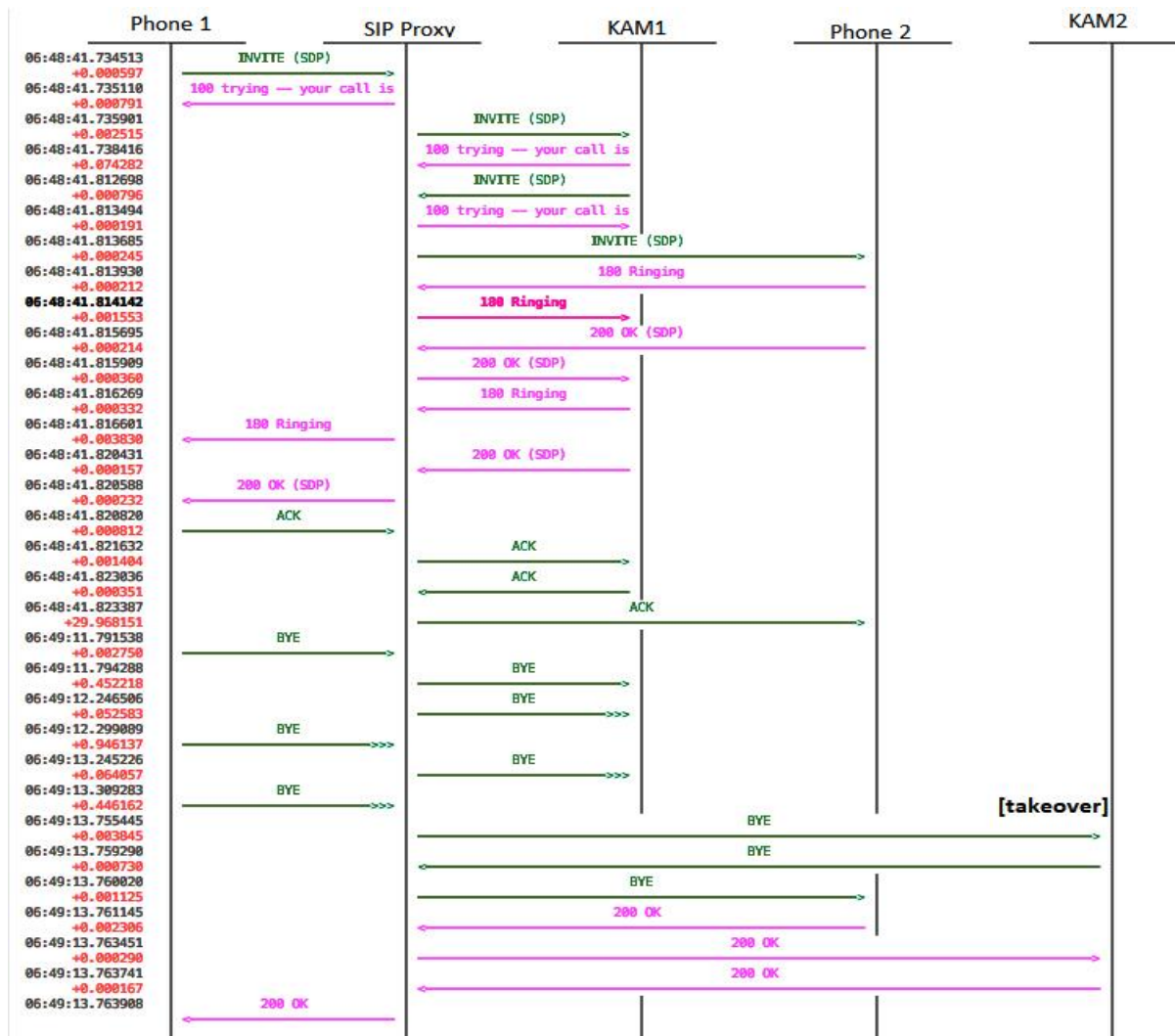


Рис. 2. Сигнальний трейс голосового виклику (Voice call signal trace) з подальшою відмовою сигнального сервера КАМ1

2) SIP транзакція буде опрацьована сигнальним сервером KAM1, а голосовий потік формується медіа шлюзом RTPE1;

3) після успішного встановлення з'єднання між цими абонентами ми штучно вносимо відмову сигнального серверу RTPE1, власне вимикаємо віртуальний комп'ютер;

4) REDIS відстежує вихід з ладу медіа шлюзу RTPE1 та виконує аварійне перемикавання сесії на RTP2;

5) RTP2 виконує обробку RTP трафіка для існуючих та нових голосових викликів.

На рис. 2 наведено голосовий виклик між абонентами Phone1 та Phone2 через високодоступну VoIP систему, яка складається з абонентських SIP-терміналів Phone1 та Phone2, серверів сигналізації KAM1 та KAM2 та SIP проху, який в данному випадку виконує роль ретранслятора SIP повідомлень та надає можливість зібрати повний трейс сигнального обміну між вищезазначеними елементами системи. Розглянемо більш детально як саме проходить голосовий виклик.

На момент 06:48:41.734513 від абонента Phone1 надходить SIP-повідомлення **INVITE**, мета якого створити нову сесію голосового зв'язку з унікальним ідентифікатором **call-id** [1]. У відповідь на **INVITE**, абонент Phone1 отримує повідомлення **100 Trying** (запит у обробці) від SIP Proху, який в свою чергу ретранслює повідомлення **INVITE** до сигнального серверу KAM1, що є активним за замовченням. KAM1 у свою чергу перевіряє внутрішню таблицю маршрутизації, знаходить IP адресу абонента Phone2, змінює його в полі «**To:**» повідомлення **INVITE**, та пересилає його до SIP Proху в момент часу 06:48:41.812698.

Після отримання **INVITE**, SIP Proху пересилає його кінцевому абоненту Phone2 та у відповідь отримує повідомлення **180 Ringing** (викликаємо абонента), яке в свою чергу транслюється сигнальному серверу KAM1.

В 06:48:41.815692 від абонента Phone2 до SIP Proху надходить повідомлення **200 OK** (абонент відповів на виклик), яке далі транслюється на сигнальний сервер KAM1 і далі кінцевому абоненту Phone1. Отримавши повідомлення **200 OK** про те, що абонент прийняв голосовий виклик, Phone1 відсилає підтвердження у вигляді повідомлення **ACK**, яке в свою чергу транслюється кінцевому абоненту Phone2 через SIP Proху та KAM1 (часовий інтервал 06:48:41.820820 - 06:48:41.823387).

Вносимо штучну відмову сигнального сервера KAM1 (вимикаємо віртуальну машину).

В 06:49:11.791538 абонент відправляє до SIP Proху повідомлення про завершення виклику **BYE**, яке транслюється до сигнального серверу KAM1.

Не отримавши ніякої відповіді від сигнального серверу KAM1, SIP Proху відправляє повідомлення **BYE** до серверу KAM2, який в свою чергу ідентифікує транзакцію по SIP call-id, раніше отриманого через DMQ інтерфейс від серверу KAM1 та пересилає його кінцевому абоненту Phone2.

В свою чергу абонент Phone2 відправляє повідомлення про підтвердження завершення виклику **200 OK** до абонента Phone1 по ланцюгу Phone2 – SIP Proху – KAM2 – SIP Proху – Phone1.

Таким чином ми бачимо, що після відмови сигнального серверу KAM1 SIP-діалог не обривається, а в 06:49:13.755445 продовжується оброблятися сигнальним сервером KAM2. Переключення на гарячий резерв виконується в автоматичному режимі, завдяки чому вплив на сервіс з'єднання відсутній.

**Висновки.** Розроблено та практично реалізовано високодоступну VoIP-систему, яка забезпечує безперервну роботу сервісу у разі відмов окремих компонентів. Запропоноване рішення цієї системи підтвердило свою ефективність під час експериментальної перевірки та може бути рекомендоване для практичного використання.

У статті детально розглянуто практичну реалізацію високодоступної VoIP-системи, яка складається з наступних основних компонентів:

- кластера SIP-серверів Kamailio;
  - системи реплікації даних за допомогою Redis;
  - кластера RTPengine для обробки медіапотоків;
  - механізмів VRRP, BFD та Keepalived для контролю доступності вузлів.
- Особливу увагу приділено:
- взаємодії між сигнальною та медіа-підсистемами;
  - алгоритмам автоматичного перемикавання при відмовах;
  - збереженню безперервності сервісу для кінцевих користувачів.

У роботі наведено приклади конфігурацій, схеми взаємодії компонентів та результати тестування працездатності системи.

Наукова новизна роботи полягає у розробці та практичному обґрунтуванні комплексної архітектури високодоступної VoIP-системи, що базується на відкритому програмному забезпеченні.

Основні положення, які визначають наукову новизну, полягають у наступному:

– Запропоновано нову архітектурну модель високодоступної VoIP-системи, яка поєднує кластерну SIP-сигналізацію та відмовостійку медіабробку.

– Удосконалено метод синхронізації SIP-реєстрацій та стану викликів шляхом використання in-мемору бази даних Redis та механізмів обміну повідомленнями між вузлами Kamailio.

– Розроблено практичний механізм резервування RTP-медіашлюзів, що забезпечує збереження безперервності медіапотоків у разі відмови одного з вузлів.

– Доведено можливість побудови високодоступної VoIP-системи без використання комерційних рішень, що має важливе прикладне значення.

Отримані результати мають відтворюваний характер, що дозволяє застосовувати запропоновану архітектуру у реальних телекомунікаційних мережах.

#### Список літератури:

1. Mierla D.C., Modroiu E.R. "SIP Routing with Kamailio" 2022 356p.
2. RTPEngine. URL: <https://rtpengine.readthedocs.io>.
3. Carlson J.L. Redis in action. 2013. 320 p.
4. Keepalived. URL: <https://keepalived.org>.
5. Приймак С.О., Кравчук С.О. Метод підвищення доступності VoIP-систем. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75). № 2. 123–129. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/19>
6. Pryimak S.O., Kravchuk S.O. VoIP system with high availability. *Information and Telecommunication Sciences*. 2025. 16(1), 59–66. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12025.59-66>
7. Habraken J. Practical Cisco Routers. QUE USA, 1999. 315p.
8. Roy O.P., Kumar V. A Survey on Voice over Internet Protocol (VoIP) Reliability Research. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 6th International Conference on Computers Management & Mathematical Sciences (ICCM 2020). 2020. Vol. 1020, pp. 12-19 Nirjuli, India, DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1020/1/012015>
9. Tulemu W., Design of an asterisk-based VoIP system and the implementation of security solution across the VoIP network. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol.1. № 23(01), P.875–906 DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23>
10. Tobiloba K.A., Building a Secure Asterisk-Based VoIP System Design and Implementation, Researchgate, 2023. Vol. 4, № 9(82). p. 4–11. URL: <https://www.researchgate.net/publication/388707610>
11. Martin A., Gamess E., Urribarri D., Gómez J. A Proposal for A High Availability Architecture for VoIP Telephone Systems based on Open Source Software. *(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2021. Vol. 9, No. 9, 20. 2023. URL: [https://thesai.org/Downloads/Volume9No9/Paper\\_1-A\\_Proposal\\_for\\_a\\_High\\_Availability\\_Architecture.pdf](https://thesai.org/Downloads/Volume9No9/Paper_1-A_Proposal_for_a_High_Availability_Architecture.pdf)
12. The Sipwise C5 CE Handbook mr8.5.10. 400p. URL: <https://www.sipwise.com/doc/mr8.5.10/handbook-ce.pdf>.
13. Wu W. Packet Forwarding Technologies. Auerb Publications. 2008. 446 p.
14. Ahmed A., Madani H., Siddiqui T., Voip Performance Management and Optimization, Cisco Press. 2010. 448 p.
15. Rosenberg J., Schulzrinne H., Camarillo G., Johnston A., Peterson J., Sparks R., Handley M., Schooler E. SIP: Session Initiation Protocol. RFC 3261. Internet Engineering Task Force (IETF) 2002, 269p.
16. Pal S., Gadde R., Latchman H.A. On The Reliability of Voice Over IP Telephony. *Computer Science, Engineering*. 2011. URL: [https://www.iiis.org/CDs2011/CD2011IMC/CCCT\\_2011/PapersPdf/TA224EV.pdf](https://www.iiis.org/CDs2011/CD2011IMC/CCCT_2011/PapersPdf/TA224EV.pdf).
17. Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. Possibilities of improving the voice services quality in 5G networks. *Information and Telecommunication Sciences*. 2023. Vol.14, No 2. pp. 9–16. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22023.9-16>

#### Pryimak S.O., Kravchuk S.O. DEPLOYMENT OF HIGHLY AVAILABLE VOIP SYSTEM

The article describes the practical implementation of VoIP (Voice over IP) systems with increased availability, which provides voice communication over IP networks. An example of a practical implementation of a complete VoIP system is given, in particular, configuring and testing the main components to ensure service continuity, fault tolerance, scalability and resource efficiency.

The proposed approach for practical implementation of a VoIP system is based on the use of free software Kamailio (SIP signaling server), RTPengine (media traffic processing) and Redis (high-speed database for storing RTP transactions). All components are based on the Linux platform. The implemented architecture

*includes mechanisms for automatic failover of signaling servers and media gateways using the VRRP protocol, load balancing and seamless switching to backup nodes in the event of failure of one or more components.*

*This is significantly different from traditional approaches, where the failure of one of the key elements (signaling server or media gateway) leads to the immediate termination of all active connections.*

*Experimental simulation of the system operation was performed, which confirmed its high efficiency: even in the event of a failure of 50% of the components, the system remains operational and does not interrupt any active voice call.*

*The results obtained may be useful for developers and operators of VoIP networks, mobile operators, as well as enterprises that using IP telephony for critical communications. The proposed approach to system implementation allows minimizing the risks of communication interruption, improving the quality of user service and ensuring high reliability of VoIP services.*

**Keywords:** *VoIP system, SIP, Kamailio, RTP, RTPengine, VRRP, high availability, reliability.*

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026



УДК 621.396

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/17>

**Семенова О.О.**

<https://orcid.org/0000-0001-5312-9148>

Вінницький національний технічний університет

**Войцеховська О.О.**

<https://orcid.org/0000-0001-8504-1204>

Вінницький національний технічний університет

**Джус А.В.**

<https://orcid.org/0009-0005-3583-5766>

Вінницький національний технічний університет

**Кузняк В.П.**

<https://orcid.org/0009-0001-1775-420X>

Вінницький національний технічний університет

## РОЗРОБЛЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ІНДЕКСУ ДОВІРИ В ІНТЕРНЕТІ РЕЧЕЙ

У статті запропоновано підхід до оцінювання індексу довіри до пристроїв в мережах Інтернету речей на основі обчислювального інтелекту, а саме нечіткої логіки та еволюційної оптимізації. Актуальність дослідження зумовлена зростанням кількості пристроїв Інтернету речей, які функціонують у потенційно складному середовищі, де традиційні методи забезпечення безпеки та оцінювання довіри часто є недостатньо ефективними. Оцінювання довіри розглядається як важливий механізм підвищення надійності та безпеки мереж Інтернету речей. Запропонована у ході дослідження модель базується на нечіткому контролері типу Мамдані. Модель має три вхідні змінні, сформовані з мережевих параметрів датасету NSL-KDD, та одну вихідну змінну, що відповідає індексу довіри до пристрою Інтернету речей. Для всіх вхідних і вихідної змінних використано гаусові функції належності, що забезпечує плавність логічного висновку та стійкість до невизначеності даних. База правил складається з повного набору логічних правил, які формалізують експертні знання щодо поведінки довірених і зловмисних вузлів. Розроблений нечіткий контролер формує метрику довіри, що дозволяє класифікувати пристрої IoT як надійні, потенційно небезпечні або зловмисні. З метою підвищення точності оцінювання індексу довіри до пристрою Інтернету речей було здійснено оптимізацію параметрів розробленого нечіткого контролера за допомогою генетичного алгоритму та методу рою частинок. Для оцінювання якості моделей застосовано такий показник як середньоквадратична похибка між прогнозованими та еталонними значеннями індексу довіри. Результати комп'ютерного моделювання підтверджують, що оптимізовані нечіткі контролери суттєво перевершують базову модель за точністю, а підхід з використанням методу рою частинок продемонстрував найкращі показники ефективності. Запропонована модель може бути інтегрована у системи безпеки Інтернету речей для підвищення надійності взаємодії між пристроями.

**Ключові слова:** Інтернет речей, телекомунікації, безпека, довіра, нечіткий контролер, генетичний алгоритм, метод рою частинок, оптимізація.

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій зумовив масове впровадження високошвидкісних мереж зв'язку, що забезпечують безперервний обмін даними між великою кількістю пристроїв. Наразі широке

впровадження Інтернету речей (Internet of Things, IoT) супроводжується появою великої кількості гетерогенних розумних пристроїв, що взаємодіють між собою у одній мережі. У таких умовах питання безпеки та надійності обміну даними

стає надзвичайно важливим, оскільки компрометація навіть невеликої кількості вузлів може спричинити суттєве погіршення роботи всієї системи. Існуючі підходи до оцінювання значення рівня довіри до пристроїв здебільшого спираються на статистичні методи, що або мають низьку точність, або потребують великих обсягів навчальних даних і значних обчислювальних ресурсів.

У зв'язку з цим актуальною є проблема розроблення інтелектуального підходу до оцінювання індексу довіри до пристроїв Інтернету речей, здатного ефективно працювати в умовах невизначеності даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження у галузі IoT стосуються підвищення точності, масштабованості та гнучкості мереж. Однак часто вони не враховують такі важливі аспекти, як цілісність, доступність та конфіденційність даних.

Основна увага до довіри та репутації в пристроях Інтернету речей зосереджена на довірі всередині архітектури, застосунках та пристроїв на всіх рівнях IoT. Покращення конфіденційності та автентифікації користувачів відіграють вирішальну роль у створенні розумного середовища, що стає можливим завдяки інтеграції довіри та репутації в передачу даних.

Одним із підходів до оцінки довіри є методи, засновані на репутації, які спираються на показники, що збираються в розподілених середовищах. Як відомо, залежно від показників ефективності, що застосовуються для оцінки довіри та репутації IoT, розрізняють дві групи методів: традиційні схеми, засновані на управлінні довірою, та схеми управління довірою на основі штучного інтелекту.

Зокрема, в роботі [1] було розроблено централизовану схему управління довірою до пристроїв Інтернету речей, що передбачає обмін послугами між пристроями на базі сертифікатів довіри без проведення розрахунків довіри. У статті [2] для встановлення довіри до вузлів мережі запропоновано систему визначення їх репутації. Автори роботи [3] створили динамічну модель управління довірою, яка дозволяє вузлам мережі самостійно оцінювати поведінку своїх однорангових вузлів і призначати винагороди та штрафи. В дослідженні [4] була розроблена модель довіри, що інтегрує прямі та непрямі відомості про довіру для визначення значень довіри до пристроїв в IoT.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється застосуванню методів штучного інтелекту, зокрема нечіткої логіки, як ефективного

інструменту для оцінювання довіри до пристроїв у мережах Інтернету речей. Так, у статті [5] розглядається поведінка користувача у моделі довіри для виявлення будь-яких аномальних закономірностей. У розробленій структурі використовувалася нечітка логіка для оцінки значень як всебічної, так і прямої довіри. Методика, представлена в роботі [6] базується на нечіткій логіці і спрямована на виявлення ненадійних вузлів. У роботі [7] запропонували схему управління довірою, яка побудована на принципах Байєсівського навчання та спільного фільтрування для забезпечення надійності.

Методи машинного навчання також широко застосовуються для оцінювання довіри шляхом аналізу надійності вузлів на основі довірчих характеристик. У наукових дослідженнях використовуються різні підходи, зокрема логістична регресія для класифікації ненадійних вузлів у мережах із втратами [17], дерева рішень для виявлення зловмисних дій [18], а також кластеризація K-середніх і регресійні моделі для поділу вузлів на надійні та ненадійні [19]. Перспективним напрямом є також застосування глибоких нейронних мереж для адаптивного управління довірою в мережах Промислового Інтернету речей, що забезпечує виявлення нових типів атак [20]. У роботі [21] було запропоновано використати метод LSTM (Long short-term memory, довга короткочасна пам'ять) для визначення порогу довіри на основі змін у поведінці та алгоритм багатоатрибутової оцінки для обчислення значень рівня довіри.

Таким чином, хоча на сьогодні існує значна кількість досліджень у сфері оцінювання довіри до пристроїв Інтернету речей, недостатня увага приділяється застосуванню гібридних методів, що поєднують декілька технологій обчислювального інтелекту та дозволяють використати їхні взаємні переваги для підвищення точності, що і зумовлює необхідність даного дослідження.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження гібридного інтелектуального підходу до оцінювання індексу довіри в мережах Інтернету речей на основі технологій обчислювального інтелекту, зокрема нечіткої логіки та еволюційних алгоритмів.

Для досягнення мети пропонується розробити нечіткий контролер для оцінювання індексу довіри до пристроїв Інтернету речей. Для цього спочатку необхідно сформовано відповідні математичні моделі, що описують роботу контролера та процес нечіткого висновку, а також оптиміза-

цію його параметрів за допомогою еволюційних алгоритмів. Для дослідження ефективності, оптимізації та валідації запропонованої моделі буде використано середовище MATLAB.

**Виклад основного матеріалу. Розроблення нечіткого контролера для оцінювання індексу довіри до пристроїв IoT.** У даному дослідженні розробляється нечіткий контролер, який призначений для обчислення індексу довіри до пристроїв Інтернету речей.

Вхідні змінні розробленої моделі нечіткого контролера представляють собою кількісні характеристики поведінки вузла мережі IoT, сформовані на основі відповідних мережевих ознак датасету NSL-KDD. Цей датасет представляє собою загальнодоступний набір мережевих даних, містить характеристики мережевих з'єднань нормальної та аномальної поведінки, і широко використовується для дослідження методів виявлення атак і забезпечення безпеки в телекомунікаційних мережах.

Отже, у розробленому нечіткому контролері перша вхідна величина  $E$  (error) відображає частку з'єднань, під час яких були виявлені помилки у мережевих запитах. Високе значення цього показника свідчить про можливі ознаки сканування портів або спроби атаки типу флуд. Таким чином, даний показник є індикатором потенційно шкідливої активності в мережі.

Друга вхідна величина нечіткого контролера  $C$  (count) відображає кількість мережевих з'єднань, встановлених до хоста протягом останніх двох секунд. Високе значення цього параметра може свідчити про підозрілу активність, наприклад сканування або спроби перевантаження сервера. Цей показник допомагає виявляти аномальні патерни трафіку, характерні для атак.

Третя вхідна величина нечіткого контролера  $B$  (bytes) відображає кількість байтів, переданих від джерела до призначення під час мережевого з'єднання. Високі значення цього параметра можуть свідчити про інтенсивну передачу даних, що є типовим як для легітимних сервісів, так і для певних типів атак. Цей показник дозволяє аналізувати обсяг трафіку та виявляти нетипові або підозрілі патерни поведінки.

Вихідна величина нечіткого контролера – індекс довіри  $T$  (trust index) – відображає рівень надійності або безпечності пристрою в мережі Інтернету речей. Вона формується на основі аналізу вхідних показників і дозволяє визначати, наскільки можна покладатися на пристрій у рамках безпечності виконання його функцій. Зна-

чення індексу довіри можна використовувати для прийняття рішень щодо доступу, взаємодії або ізоляції пристрою в мережі.

Розглянемо математичні моделі, які описують функціонування розробленого нечіткого контролера. Позначимо вхідні змінні  $E, C, B$  як  $x_i$  і припустимо, що кожна з них нормалізована у діапазоні  $[0, 1]$ , що запобігатиме домінуванню окремих характеристик.

Для опису можливих значень трьох вхідних параметрів використано по три гаусові функції належності, що відповідають лінгвістичним термам малий, середній, великий. Гаусова функція вибрана через її плавну форму та здатність забезпечувати неперервний перехід між станами. Математично кожна така функція належності визначається виразом

$$\mu_{A_{i,j}}(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - c_{i,j})^2}{2\sigma_{i,j}^2}\right), \quad (1)$$

де  $x_i$  – значення  $i$ -ї вхідної величини;  $c_{i,j}$  – центр функції належності для терму  $j$  на вхідній величині  $i$ ;  $\sigma_{i,j}$  – ширина цієї функції.

Для опису вихідної величини використано п'ять гаусових функцій належності з такими лінгвістичними термами: дуже низький, низький, середній, високий, дуже високий. Вихідні функції належності описуються формулою

$$\mu_{B_k}(y) = \exp\left(-\frac{(y - c_k)^2}{2\sigma_k^2}\right). \quad (2)$$

Тут параметри  $c_k$  та  $\sigma_k$  визначають форму вихідних нечітких множин для  $k$ -го терму.

Основою роботи нечіткого контролера є база правил нечіткого виведення. Кожне правило формулюється у вигляді:

$$\text{IF } x_1 \text{ is } A_{1,j_1} \text{ AND } x_2 \text{ is } A_{2,j_2} \text{ AND } x_3 \text{ is } A_{3,j_3} \text{ THEN } y \text{ is } B_k. \quad (3)$$

Для кожного правила визначається ступінь його активації. Інтенсивність спрацювання правила обчислюється через мінімальний ступінь належності серед його вхідних умов:

$$\alpha_r = \min(\mu_{A_{1,j_1}}(x_1), \mu_{A_{2,j_2}}(x_2), \mu_{A_{3,j_3}}(x_3)). \quad (4)$$

Отримане значення  $\alpha_r$  представляє собою вагу, з якою дане правило впливає на формування вихідної нечіткої множини. Далі виконується імплікація, яка полягає у відсіченні вихідної функції належності за рівнем активації:

$$\mu_{y_r}(y) = \min(\alpha_r, \mu_{B_k}(y)). \quad (5)$$

На наступному етапі у контролері здійснюється агрегація усіх активованих правил. Агрегована функція належності формуються шляхом максимізації по всіх отриманих часткових вихідних значеннях:

$$\mu_Y(y) = \max_{r=1, \dots, 27} \mu_{Y_r}(y). \quad (6)$$

Останнім етапом є дефазифікація, яка в даному контролері виконується за методом центроїда. Таким чином, дефазифіковане значення індексу довіри розраховується за формулою:

$$y^* = \frac{\int_0^1 y \mu_Y(y) dy}{\int_0^1 \mu_Y(y) dy}. \quad (7)$$

Вихідне значення є якісною оцінкою довіри, що використовується у прийнятті рішень щодо доступу, взаємодії або ізоляції пристрою в мережі IoT.

#### Оптимізація нечіткого контролера.

Оскільки робота нечіткого контролера значною мірою залежить від правильності та релевантності функцій належності та бази правил, з метою підвищення точності його функціонування було виконано оптимізацію розробленої моделі шляхом застосування еволюційних алгоритмів, а саме – генетичного та рою частинок. Отже, об'єктом оптимізації був набір параметрів нечіткого контролера, зокрема центри та ширини гаусових функцій належності для кожної вхідної та вихідної змінної, а також коефіцієнти бази правил.

Спочатку була здійснена оптимізація параметрів нечіткого контролера за допомогою генетичного алгоритму (ГА). У даному випадку кожна хромосома ГА кодує повний набір значень центрів і стандартних відхилень гаусових функцій належності для всіх вхідних та вихідної змінних. Крім того хромосома також кодує структуру нечітких правил. Хромосома може бути представлена як вектор виду:

$$\mathbf{P} = [\theta_{MF}, \theta_{rules}], \quad (8)$$

де  $\theta_{MF}$  містить параметри  $c$  і  $\sigma$  усіх гаусових функцій,  $\theta_{rules}$  – кодування бази правил.

Оскільки розроблений нечіткий контролер містить 27 правил, то база правил кодується вектором:

$$\mathbf{R} = r_1, r_2, \dots, r_{27}. \quad (9)$$

Розгорнута формула хромосоми, що містить усі параметри функцій належності та всі правила виглядає так:

$$\mathbf{P} = [c_{E,1}, \sigma_{E,1}, c_{E,2}, \sigma_{E,2}, c_{E,3}, \sigma_{E,3}, c_{C,1}, \sigma_{C,1}, c_{C,2}, \sigma_{C,2}, c_{C,3}, \sigma_{C,3}, c_{B,1}, \sigma_{B,1}, c_{B,2}, \sigma_{B,2}, c_{B,3}, \sigma_{B,3}, c_{T,1}, \sigma_{T,1}, c_{T,2}, \sigma_{T,2}, c_{T,3}, \sigma_{T,3}, c_{T,4}, \sigma_{T,4}, c_{T,5}, \sigma_{T,5}, r_1, r_2, \dots, r_{27}]. \quad (10)$$

Таким чином, у процесі оптимізації нечіткого контролера не лише налаштовується форма його функцій належності, але й можлива реконфігурація логіки його роботи.

Оцінювання якості кожної хромосоми здійснюється за допомогою функції пристосованості. У даному дослідженні якість контролера визначається через середньоквадратичну помилку між отриманими значеннями і значеннями індексу довіри з навчальної вибірки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^{pred} - y_i^{true})^2}. \quad (11)$$

Основною метою оптимізації є мінімізація цієї метрики, а отже, пошук оптимального набору параметрів:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} RMSE(\theta). \quad (12)$$

Тут ГА здійснює еволюційний пошук оптимальної конфігурації параметрів, що дозволяє ефективно досліджувати простір рішень і уникати локальних мінімумів, тобто вишується глобальний пошук оптимальних параметрів.

У даній роботі також досліджено застосування ще одного методу еволюційної оптимізації – методу рою частинок (МРЧ). Кожна частинка репрезентує один можливий набір параметрів нечіткого контролера. Як і в генетичному алгоритмі, параметри кодуються як набір значень центрів та стандартних відхилень гаусових функцій належності, а також коефіцієнтів бази правил. Нехай  $S_i(t)$  позначає позицію  $i$ -тої частинки на ітерації  $t$ . Вона містить повний набір оптимізованих параметрів:

$$S_i(t) = [\theta_{MF}(t), \theta_{rules}(t)]. \quad (13)$$

Кожна частинка також оцінюється за функцією пристосованості RMSE. МРЧ прагне знайти таке положення частинки, яке мінімізує RMSE, тобто:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} RMSE(\theta). \quad (14)$$

Таким чином, МРЧ поступово коригує параметри нечіткого контролера, що дозволяє швидше знаходити оптимальні рішення.

**Комп'ютерне моделювання.** Для дослідження розробленого нечіткого контролера для оцінювання індексу довіри в Інтернеті речей було використано програмний пакет MATLAB, який зарекомендував себе як один із найпотужніших інструментів для моделювання як інтелектуальних так і телекомунікаційних систем.

Загальний вигляд запропонованого нечіткого контролера в середовищі MATLAB подано на рис. 1,а, що ілюструє структуру моделі.

У процесі моделювання нечіткого контролера у програмі MATLAB спочатку були введені вхідні та вихідні змінні із відповідним визначенням діапазонів значень та параметризацією функцій належності для кожної з них. На цьому етапі було проведено ретельне налаштування гаусових функцій належності, що визначали лінгвістичні терми для вхідних та вихідної змінних. Після цього було створено повну базу нечітких правил, що встановлює логічні відповідності між різними комбінаціями вхідних даних та бажаною реакцією контролера. Формування цієї бази передбачало врахування поведінкових закономірностей трафіка в Інтернеті речей. Наступним кроком стало налаштування методів агрегування, імплікації та дефазифікації відповідно до обраної моделі контролера.

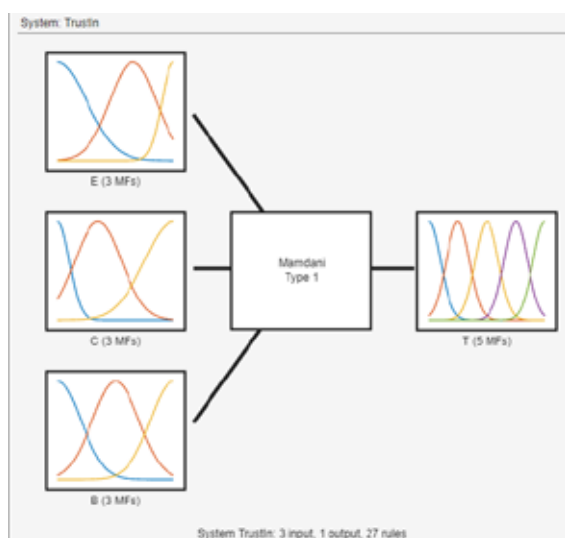
Для дослідження точності роботи розробленого нечіткого контролера була проведена серія комп'ютерних експериментів у програмному середовищі MATLAB. Експерименти передбачали моделювання поведінки контролера за різних комбінацій значень вхідних параметрів, що дозволило охопити широкий спектр можливих сценаріїв функціонування мережі IoT. На рис. 1,б, подано приклад результату моделювання роботи розробленого контролера.

Метою оптимізації є мінімізація середньоквадратичної помилки між вихідними значеннями індексу довіри, згенерованими контролером, та

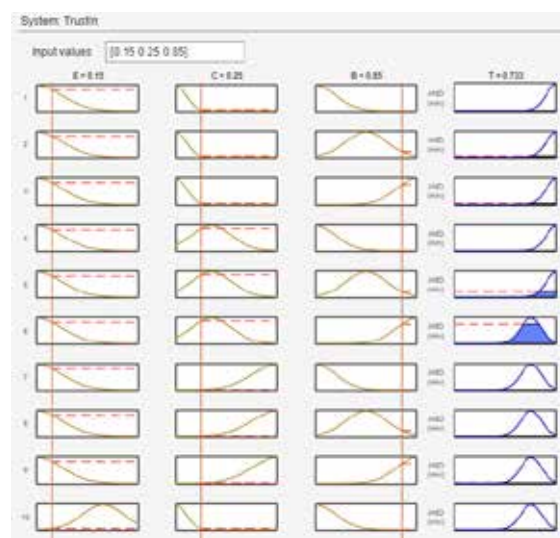
еталонними даними, що дозволить підвищити точність розробленої моделі.

Спочатку було виконано оптимізацію параметрів нечіткого контролера за допомогою ГА. Графік, поданий на рис. 2,а та отриманий у середовищі MATLAB, відображає процес збіжності навчання під час оптимізації параметрів контролера за допомогою ГА. По осі абсцис на графіку відкладено номер покоління, тоді як по осі ординат представлено значення функції пристосованості, зокрема середньоквадратичної похибки RMSE. Зменшення значення RMSE зі збільшенням кількості поколінь свідчить про поступове покращення якості налаштування параметрів контролера. Наступним етапом дослідження був пошук оптимальних параметрів нечіткого контролера за допомогою методу рою частинок. Отриманий у середовищі MATLAB (рис. 2,б) графік оптимізації відображає динаміку збіжності алгоритму МРЧ у процесі мінімізації функції пристосованості. Крива збіжності поступово вирівнюється та стабілізується, що вказує на досягнення глобально найкращого або близького до нього розв'язку задачі оптимізації.

З метою перевірки точності розробленого нечіткого контролера у оцінюванні індексу довіри до пристроїв було здійснено валідацію всіх трьох моделей на основі незалежних тестових даних. Процедура валідації передбачала визначення вихідних значень контролера для кожного прикладу з тестового набору та подальше порівняння їх з еталонними значеннями, отриманими під час попереднього аналізу даних. Отримані у ході



а



б

Рис. 1. Нечіткий контролер в програмі MATLAB: а – загальний вигляд; б – результат роботи

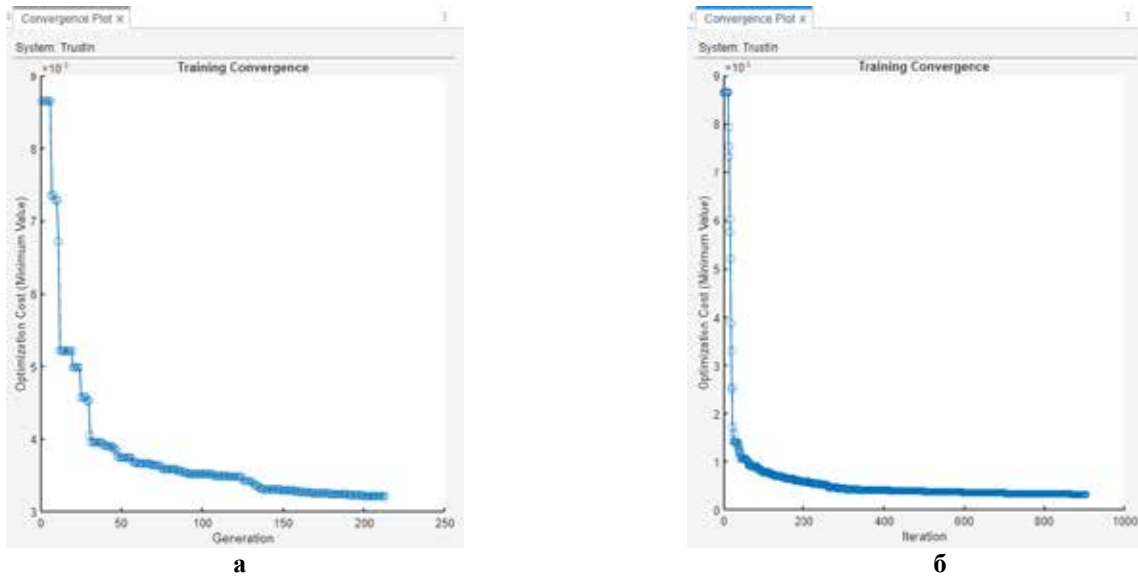


Рис. 2. Процес оптимізації параметрів нечіткого контролера: а – за допомогою генетичного алгоритму; б – за допомогою методу рою частинок

графічні залежності ілюструють співвідношення між еталонними та змодельованими значеннями індексу довіри (рис. 3). На цих графіках було проведено візуальне зіставлення, яке дозволяє визначити наявність суттєвих розбіжностей між двома множинами даних.

Отримані результати свідчать, що для базової моделі нечіткого контролера відхилення між фактичними та прогнозованими значеннями є незначними, що підтверджує її здатність правильно визначати значення індексу довіри. Разом із тим, застосування генетичного алгоритму для оптимізації параметрів нечіткого контролера

забезпечило помітне покращення точності, що відображено у більш тісному узгодженні між змодельованими та еталонними даними. Найкращі результати були отримані для моделі, оптимізованої методом рою частинок: вона демонструє мінімальні відхилення, що свідчить про високу ефективність МРЧ у задачах глобальної оптимізації нечітких систем. Таким чином, проведена валідація підтверджує працездатність розробленого контролера та доцільність подальшого використання його оптимізованої моделі як складової частини архітектури системи оцінювання довіри в IoT.

**Висновки.** У представлений статті було розроблено, оптимізовано та досліджено нечіткий контролер для оцінювання індексу довіри до пристроїв в мережах Інтернету речей. Побудована модель контролера на основі системи Мамдані з трьома вхідними змінними та однією вихідною змінною продемонструвала здатність репрезентувати поведінку процесів систем безпеки та забезпечувати відображення взаємозв'язків між параметрами трафіку мереж IoT.

Проведені комп'ютерні експерименти у середовищі MATLAB підтвердили коректність структури функцій належності та побудованої бази нечітких правил. Валідація на тестових даних продемонструвала задовільний рівень точності моделі.

Для підвищення точності оцінювання було виконано оптимізацію параметрів розробленого нечіткого контролера за допомогою еволюційних алгоритмів.

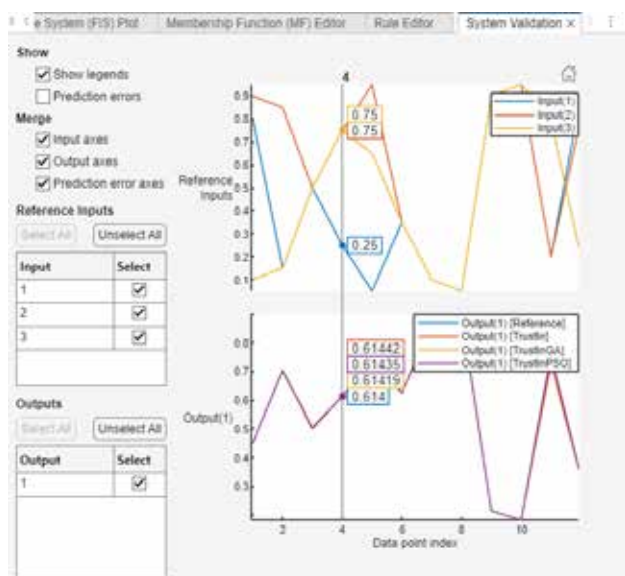


Рис. 3. Результати валідації роботи нечіткого контролера



Застосування генетичного алгоритму дозволило налаштувати параметри функцій належності та коефіцієнти правил, що привело до суттєвого зменшення середньоквадратичної помилки. Отримані результати продемонстрували помітне підвищення точності оцінювання довіри порівняно з неоптимізованою моделлю. Подальша оптимізація за допомогою методу рою частинок забезпечила ще кращі показники – МРЧ-оптимізований контролер досяг найменших відхилень від еталонних даних, забезпечивши найвищу точність та стабільність роботи під час валідації.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що використання нечіткої логіки у поєднанні з еволюційними методами оптимізації є ефективним підходом для

розв’язання задачі оцінювання індексу довіри в Інтернеті речей. Розроблений контролер може бути використаний як складова інтелектуальних систем безпеки IoT, забезпечуючи високоточне прийняття рішень щодо безпечності та надійності конкретного пристрою.

Отримані результати свідчать про доцільність використання технологій обчислювального інтелекту, зокрема нечітких контролерів та еволюційних алгоритмів, для забезпечення безпеки та надійності IoT-пристроїв.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення бази правил, врахування додаткових характеристик мережевого трафіку та інтеграцію нечіткого контролера з методами машинного навчання.

### Список літератури:

1. Din I. Ud, Bano A., Awan K. A., Almogren A., Altameem A., Guizani M. LightTrust: Lightweight Trust Management for Edge Devices in Industrial Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023. Vol. 10. No. 4. Pp. 2776–2783. DOI: <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3081422>
2. Chen J., Tian Z., Cui X., Yin L., Wang X. Trust architecture and reputation evaluation for internet of things. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2018. Vol. 10. No. 8. Pp. 3099–3107. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0887-z>
3. Hamdani S. W. A., Khan A. W., Iltaf N., Bangash J. I., Bangash Y. A., Khan A. Dynamic distributed trust management scheme for the Internet of Things. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2021. Vol. 29. No. 2. Pp. 796–815, 2021. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3906/elk-2003-5>
4. Liu Y., Zhang C., Yan Y., Zhou X., Tian Z., Zhang J. A Semi-Centralized Trust Management Model Based on Blockchain for Data Exchange in IoT System. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2023. Vol. 16. No. 2. Pp. 858–871. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsc.2022.3181668>
5. Alruwaythi M., Nygard K. E. Fuzzy Logic Approach Based on User behavior Trust in Cloud Security. 2019 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). *Brookings*, SD, USA, 20-22 May 2019. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/eit.2019.8834173>
6. Alshehri M. D., Hussain F. K. A fuzzy security protocol for trust management in the internet of things (Fuzzy-IoT). *Computing*, 2018. Vol. 101, No. 7. Pp. 791–818. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00607-018-0685-7>
7. Singh P., Kaur A., Batth R. S., Auja G. S., Masud M. Service Versus Protection: A Bayesian Learning Approach for Trust Provisioning in Edge of Things Environment. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022. Vol. 9. No. 22. Pp. 22061–22070. DOI: <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3082272>
8. Prathapchandran K., Janani T. A Trust-Based Security Model to Detect Misbehaving Nodes in Internet of Things (IoT) Environment using Logistic Regression. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. Vol. 1850. No. 1. Pp. 012031. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1850/1/012031>
9. Kannimuthu P., Thangamuthu J. Decision Tree Trust (DTTrust)-Based Authentication Mechanism to Secure RPL Routing Protocol on Internet of Battlefield Thing (IoBT). *International Journal of Business Data Communications and Networking*, 2021. Vol. 17. No. 1. Pp. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.4018/ijbdcn.2021010101>
10. Liu L., Xu X., Liu Y., Ma Z., Peng J. A Detection Framework Against CPMA Attack Based on Trust Evaluation and Machine Learning in IoT Network. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021. Vol. 8. No. 20. Pp. 15249–15258. DOI: <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3047642>
11. Hassan M. M., Hassan Md. R., Huda S., V. H. C. de Albuquerque. A Robust Deep-Learning-Enabled Trust-Boundary Protection for Adversarial Industrial IoT Environment. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021. Vol. 8. No. 12. Pp. 9611–9621. DOI: <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3019225>
12. Alghofaili Y., Rassam M. A. A Trust Management Model for IoT Devices and Services Based on the Multi-Criteria Decision-Making Approach and Deep Long Short-Term Memory Technique. *Sensors*, 2022. Vol. 22. No. 2. Article 634. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22020634>



**Semenova O.O., Voitsekhovska O.O., Dzhus A.V., Kuzniak V.P. DEVELOPMENT  
AND OPTIMIZATION OF A FUZZY CONTROLLER FOR ESTIMATING THE TRUST INDEX  
IN THE INTERNET OF THINGS**

*The paper proposes an approach to evaluating the trust index of devices in Internet of Things (IoT) networks based on computational intelligence, specifically fuzzy logic and evolutionary optimization. The relevance of the study is driven by the rapid growth in the number of IoT devices operating in potentially complex and hostile environments, where traditional security mechanisms and trust assessment methods are often insufficient. Trust evaluation is considered a crucial mechanism for enhancing the reliability and security of IoT networks. The proposed model is based on a Mamdani-type fuzzy controller. It employs three input variables derived from network-related features of the NSL-KDD dataset and one output variable representing the trust index of an IoT device. Gaussian membership functions are used for all input and output variables, ensuring smooth inference and robustness to data uncertainty. The rule base consists of a complete set of logical rules that formalize expert knowledge regarding the behavior of trusted and malicious nodes. The developed fuzzy controller generates a trust metric that enables the classification of IoT devices as reliable, potentially dangerous, or malicious. To improve the accuracy of trust index evaluation, the parameters of the proposed fuzzy controller were optimized using a genetic algorithm and particle swarm optimization. Model performance was assessed using the root mean square error between the predicted and reference trust index values. The results of computer simulations confirm that the optimized fuzzy controllers significantly outperform the baseline model in terms of accuracy, with the particle swarm optimization approach demonstrating the highest effectiveness. The proposed model can be integrated into IoT security systems to enhance the reliability of interactions among devices.*

**Keywords:** Internet of Things, telecommunications, security, trust assessment, fuzzy controller, genetic algorithm, particle swarm, optimization.

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Судаков Є.В.**

<https://orcid.org/0009-0008-7617-5719>

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**Сокол Г.В.**

<https://orcid.org/0000-0003-4847-518X>

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТІ МАС-ПРОТОКОЛІВ У МЕРЕЖАХ З ТЕХНОЛОГІЄЮ МІМО

*У статті розроблено та досліджено стохастичну модель продуктивності МАС-протоколів у бездротових мережах із використанням технології МІМО та просторового мультиплексування. Запропонований підхід поєднує моделі конкурентного доступу до радіоканалу, імовірнісний опис колізій і повторних передач, а також інформаційно-теоретичні характеристики МІМО-каналу, зокрема його ранг і кількість незалежних просторових потоків. Це дозволяє комплексно описати взаємодію фізичного та каналного рівнів і оцінити їхній спільний вплив на пропускну здатність, затримку та ефективність використання радіоресурсів.*

*У межах моделі отримано аналітичні вирази для ймовірності колізій на МАС-рівні, ефективного часу обслуговування пакетів і середньої пропускну здатності з урахуванням стохастичної зміни параметрів трафіку та каналу. Особливу увагу приділено впливу рангу МІМО-каналу на можливості просторового мультиплексування та компенсацію негативних ефектів зростання навантаження. Математичне моделювання й імітаційні експерименти показали високу узгодженість між теоретичними залежностями та експериментальними результатами.*

*Встановлено, що зростання кількості активних користувачів підвищує колізійність МАС-протоколу та затримки обслуговування, тоді як збільшення рангу МІМО-каналу забезпечує суттєвий приріст пропускну здатності за рахунок паралельної передачі даних. Показано, що застосування МІМО з оптимальною конфігурацією антен і адаптивним просторовим мультиплексуванням дозволяє підвищити ефективність передавання в середньому на 12–14% навіть за високої щільності мережі.*

*Отримані результати підтверджують придатність запропонованої моделі для прогнозування поведінки МАС-протоколів у МІМО-мережах, оптимізації параметрів доступу та розроблення адаптивних алгоритмів управління радіоресурсами, а також для аналізу бездротових систем стандартів WLAN, 5G NR і мереж наступних поколінь.*

**Ключові слова:** МІМО, МАС-протокол, теорія черг, затримка, продуктивність, стохастична модель, пропускну здатність, бездротові мережі, теорія масового обслуговування.

**Постановка проблеми.** У сучасних бездротових телекомунікаційних системах ключовим фактором підвищення продуктивності є ефективне використання радіоресурсів у присутності зростаючого числа користувачів та складних умов радіосередовища. Розвиток технології множинного доступу з використанням множини антен (МІМО) відкриває можливість значного збільшення пропускну здатності за рахунок просторового мультиплексування, однак впровадження таких

механізмів вимагає комплексного урахування особливостей роботи протоколів доступу до середовища. Протоколи МАС-рівня визначають порядок імовірнісного доступу станцій до радіоканалу, тому їх продуктивність безпосередньо залежить від колізійності, навантаження та часових характеристик обслуговування.

Зважаючи на стохастичний характер трафіку та варіативність параметрів МІМО-каналу, виникає потреба в побудові аналітично обґрунтованої

моделі, здатної описувати взаємодію між МАС-рівнем і фізичним шаром мережі. Така модель має враховувати особливості конкурентного доступу, вплив рангу каналу на можливості просторового мультиплексування, зміну пропускну здатності та її вплив на затримку й ефективність мережі. У межах цієї роботи було розроблено стохастичну модель МАС-протоколу для МІМО-мереж та проведено експериментальну оцінку її характеристик.

Зростання кількості користувачів та різноманітність трафіку в сучасних бездротових мережах створюють критичні вимоги до ефективності протоколів доступу до середовища. В умовах технологій Wi-Fi 6/7, 5G NR та майбутніх поколінь зв'язку кількість паралельних підключень зростає, що призводить до підвищення ймовірності колізій та зниження продуктивності МАС-протоколів. У таких умовах інтеграція МІМО-технологій стає одним з ключових напрямів розвитку, оскільки просторове мультиплексування дозволяє значно збільшити сумарну швидкість передавання даних та знизити затримку за рахунок розподілу потоків між незалежними просторовими каналами.

Попри значний прогрес у дослідженнях МІМО, більшість наявних моделей фокусуються окремо або на фізичному рівні, або на роботі МАС-протоколів, що не дозволяє комплексно оцінити їх взаємний вплив. Водночас реальна продуктивність мережі визначається саме поєднанням цих аспектів: колізійність МАС-рівня безпосередньо впливає на час обслуговування, тоді як пропускну здатність МІМО-каналу задає можливості для прискорення передавання даних. Відсутність узагальненої та валідованої моделі, яка інтегрує стохастичні властивості протоколів доступу і параметри просторового мультиплексування, обумовлює актуальність проведеного в цій роботі дослідження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Стрімкий розвиток бездротових мереж стандартів Wi-Fi 6/7 та 5G NR зумовлює необхідність перегляду підходів до оцінювання продуктивності протоколів керування доступом до середовища (МАС). У сучасних дослідженнях [1, 2] зазначається, що класичні моделі випадкового доступу перестають бути адекватними в умовах масового використання багатоантенних систем (МІМО), оскільки вони не враховують можливість просторового розділення сигналів. Європейські науковці [3] акцентують увагу на тому, що в мережах високої щільності ключовим фактором деградації якості обслуговування (QoS) стає не лише колізій-

ність, а й неефективне використання просторових ступенів вільності каналу.

Значний внесок у розвиток аналітичних моделей бездротових мереж зроблено в роботах, присвячених еволюції протоколів IEEE 802.11. Зокрема, у праці [4] детально проаналізовано вплив механізмів MU-MIMO на пропускну здатність мережі, проте автори здебільшого розглядають детерміновані сценарії, залишаючи поза увагою стохастичну природу флуктуацій рангу каналу. Водночас дослідження [5] пропонують використовувати марковські ланцюги для опису динаміки обслуговування черг у системах із змінною ємністю каналу, що є близьким до проблематики даної роботи.

Українські дослідники також активно працюють над методами підвищення ефективності телекомунікаційних мереж. У роботах [6, 7] представлено тензорні та потокові моделі маршрутизації, які дозволяють оптимізувати розподіл ресурсів, однак вони здебільшого фокусуються на мережевому рівні (Network Layer). Питання взаємодії фізичного рівня (PHY) та рівня доступу (МАС) розглядаються у [8], де запропоновано методи керування трафіком у мультисервісних мережах.

Окремий напрям досліджень стосується стохастичного аналізу стабільності систем. У нещодавніх публікаціях [9, 10] авторами розроблено підходи до оцінювання QoS в умовах пікових навантажень з використанням апарату теорії масового обслуговування. Проте, незважаючи на наявність ґрунтовних праць, проблема побудови інтегрованої моделі, яка б явно пов'язувала ймовірність колізій МАС-протоколу з рангом матриці МІМО-каналу та просторовим мультиплексуванням, залишається недостатньо вивченою. Це підтверджує актуальність розроблення узагальненої стохастичної моделі, запропонованої в цій статті.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення й обґрунтування стохастичної моделі продуктивності МАС-протоколу в бездротових мережах із просторовим мультиплексуванням МІМО, яка б дозволила кількісно оцінити пропускну здатність, затримку та ймовірність колізій залежно від конфігурації антенної системи та інтенсивності мережевого трафіку. Реалізація цієї мети потребувала інтегрованого підходу, що поєднує аналітичні методи теорії масового обслуговування, моделі конкурентного доступу та інформаційно-теоретичні властивості МІМО-каналів.

Для досягнення поставленої мети було вирішено завдання побудови математичної моделі МАС-рівня з урахуванням ймовірності колізій

та повторних передач, формалізації пропускної здатності МІМО-каналу залежно від його рангу, визначення взаємозв'язку між параметрами МАС та МІМО складових, а також проведення експериментальної симуляції, що підтверджує достовірність моделі. Додатково було поставлено завдання оцінити вигоду від застосування просторового мультиплексування та визначити конфігурації, за яких МІМО забезпечує максимальний приріст продуктивності протоколу доступу.

### Виклад основного матеріалу.

#### Формалізація математичної моделі.

У мережах із множинними вхідними та вихідними антенами (МІМО) процес доступу до середовища визначається комплексом стохастичних чинників, серед яких ключову роль відіграють конкуренція користувачів за радіоканал, імовірність виникнення колізій, а також миттєвий стан багатовимірного каналу. З огляду на випадковий характер надходження трафіку, параметрів МАС-рівня та матриці каналу  $H$ , формування математичної моделі вимагає застосування апарату марковських процесів, теорії масового обслуговування та інформаційно-теоретичних положень щодо МІМО-систем (рисунк 1).

Нехай у мережі одночасно функціонує  $N$  незалежних користувачів, кожен з яких генерує пакети за пуассонівським законом із інтенсивністю  $\lambda$ . Сумарна інтенсивність надходження заявок до середовища, що використовується в процесах МАС-арбітрації, дорівнює

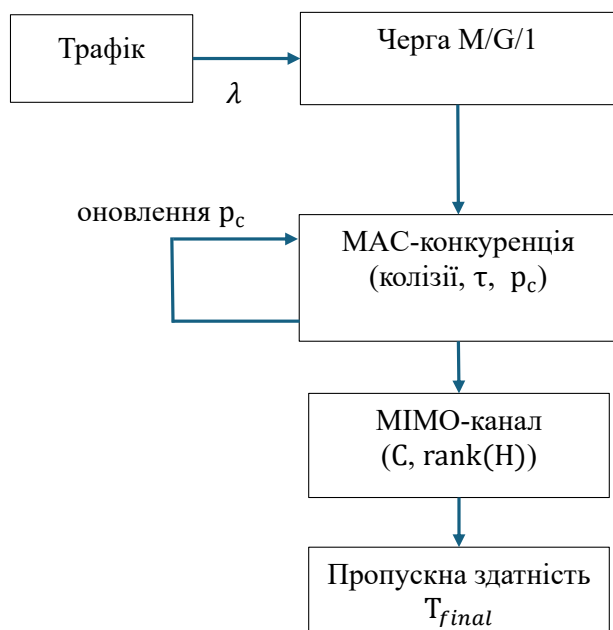


Рис. 1. Структурна схема стохастичної моделі МАС-протоколу в МІМО-мережі

$$\Lambda = N\lambda. \quad (1)$$

Це співвідношення відображає агрегований вплив множини джерел трафіку та визначає ступінь навантаження системи у випадку незалежної активності користувачів.

Просторова структура МІМО-каналу істотно впливає на швидкість передавання пакетів після отримання доступу до середовища. Пропускна здатність каналу, яка формує базовий рівень інтенсивності обслуговування, визначається класичною моделлю Шеннона:

$$C = \sum_{i=1}^{\min(n_t, n_r)} \log_2(1 + \gamma_i), \quad (2)$$

де  $\gamma_i$  – власні SNR-режими, що відповідають сингулярним компонентам матриці  $H$ . Дане рівняння підкреслює, що пропускна здатність є функцією рангу каналу та просторового мультиплексування, а отже безпосередньо пов'язана з точністю антенних конфігурацій та кореляційною структурою компонент сигналу.

На рівні МАС-протоколу ключовим стохастичним параметром є імовірність колізії  $p_c$ , яка характеризує частку передавальних спроб, що зазнають конфлікту через одночасні дії кількох користувачів у межах одного часово-частотного слота:

$$p_c = 1 - (1 - \tau)^N - N\tau(1 - \tau)^{N-1}, \quad (3)$$

де  $\tau$  – імовірність ініціювання передачі одним користувачем. Це рівняння відповідає класу моделей конкурентного доступу CSMA/CA та описує ефективність протоколу в умовах випадкової активності станцій.

З огляду на те, що колізії збільшують час обслуговування шляхом повторних передач, ефективна інтенсивність успішного обслуговування дорівнює

$$\mu_{\text{eff}} = (1 - p_c)\mu_0, \quad (4)$$

де  $\mu_0$  визначається виключно МІМО-характеристиками каналу та середньою довжиною пакета. Таким чином, стохастика МАС-рівня та фізичний стан каналу інтегруються в єдину функцію обслуговування.

Середній час обслуговування одного пакета за умов відсутності колізій обчислюється як

$$\mathbb{E}[S] = \frac{L}{C}, \quad (5)$$

де  $L$  – довжина пакета. Формула показує безпосередній зв'язок між пропускною здатністю МІМО-каналу та швидкістю, з якою МАС-рівень здатний обробляти надходження.

З урахуванням повторних спроб передавання ефективний час обслуговування має вигляд

$$\mathbb{E}[S_{\text{eff}}] = \frac{\mathbb{E}[S]}{1 - p_c}. \quad (6)$$

Підвищення  $p_c$  приводить до нелінійного збільшення часу обслуговування та, відповідно, до підвищення затримки, що є критичним для бездротових мереж реального часу.

Коефіцієнт завантаження системи, який визначає стабільність черги, записується як

$$\rho = \Lambda \mathbb{E}[S_{\text{eff}}]. \quad (7)$$

Зростання  $\rho$  до одиниці відображає перехід системи у режим насичення, що неминуче призводить до деградації QoS.

Для оцінки поведінки MAC-протоколу в умовах MIMO-каналу використовується формула Поллачека–Хінчина для середнього часу очікування в системі типу  $M/G/1$ :

$$W_q = \frac{\Lambda \mathbb{E}[S_{\text{eff}}^2]}{2(1 - \rho)}. \quad (8)$$

Оскільки квадрат математичного сподівання часу обслуговування масштабовано фактором повторних спроб, маємо

$$\mathbb{E}[S_{\text{eff}}^2] = \frac{\mathbb{E}[S^2]}{(1 - p_c)^2}. \quad (9)$$

Загальна середня затримка включає як чергову, так і сервісну компоненти:

$$D = W_q + \mathbb{E}[S_{\text{eff}}]. \quad (10)$$

Таким чином, затримка є функцією і колізійності системи, і параметрів MIMO-передавання.

Середня кількість успішних передавань на одиницю часу за наявності конкуренції між користувачами описується як

$$T = N\tau(1 - \tau)^{N-1}C. \quad (11)$$

Це рівняння фактично пов'язує зміст MAC-рівня з фізичним параметром каналу – пропускну здатністю.

Оскільки MIMO забезпечує просторове мультиплексування, фактична пропускна здатність системи збільшується за рахунок кількох незалежних потоків:

$$T_{\text{mimo}} = \eta_{\text{sm}} T, \quad (12)$$

де  $\eta_{\text{sm}}$  є показником ефективності просторового мультиплексування, що залежить від сингулярної структури каналу.

Ймовірність отримання конкретного рангу просторового мультиплексування визначається

$$P_r(k) = \Pr(\text{rank}(H) = k). \quad (13)$$

Цей параметр є статистичною характеристикою середовища та суттєво залежить від кореляційності сигналів на антенах.

Відповідне математичне сподівання пропускної здатності MIMO-каналу становить

$$\mathbb{E}[C] = \sum_{k=1}^{\min(n_t, n_r)} P_r(k) C_k, \quad (14)$$

що забезпечує узагальнене врахування стохастичності каналу та його рангової структури.

Для кількісного оцінювання виграшу від застосування просторового мультиплексування вводиться відносний показник

$$G = \frac{T_{\text{mimo}} - T}{T}. \quad (15)$$

Ймовірність успішної передачі, яка враховує як колізійність MAC-рівня, так і рангову характеристику каналу, записується як

$$p_s = (1 - p_c) P_r(r). \quad (16)$$

Остаточний вираз для пропускної здатності системи з урахуванням MIMO-модулювання набуває вигляду

$$T_{\text{final}} = p_s C. \quad (17)$$

Дана величина відображає інтегрований результат взаємодії MAC-стохастичності, просторової структури каналу та інформаційно-теоретичних характеристик MIMO-системи.

З огляду на те, що продуктивність MAC-протоколу в умовах MIMO-технології визначається не лише стохастичними характеристиками колізій, але й пропускну здатністю фізичного каналу, доцільно ввести узагальнену модель пропускної здатності, яка відображає залежність швидкості передавання від рангу матриці каналу. Нехай  $r = \text{rank}(H)$  позначає кількість незалежних просторових потоків, які можуть бути одночасно передані завдяки просторовому мультиплексуванню. Тоді пропускна здатність MIMO-каналу в інформаційно-теоретичному наближенні описується виразом

$$T_{\text{mimo}}(r) = \log_2(1 + \text{SNR} \cdot r). \quad (18)$$

Даний вираз є спрощеною формою моделі Шеннона, яка передбачає, що всі  $r$  власних каналів мають однаковий середній рівень SNR та характеризуються незалежністю відповідних передавальних потоків. Множник  $r$  відображає загальну кількість паралельних передавальних шляхів, які можуть бути реалізовані при заданому ранзі

матриці каналу. Фізичний зміст формули полягає в тому, що збільшення кількості просторових потоків приводить до лінійного зростання ефективної енергетичної освітленості приймача, що, у свою чергу, спричиняє логарифмічне збільшення пропускної здатності відповідно до закону Шеннона.

Використання моделі (18) у рамках запропонованої стохастичної схеми дозволяє пов'язати параметри на фізичному рівні (ранг каналу, SNR) з показниками продуктивності на рівні MAC-протоколу. Таким чином, отримуємо можливість інтегровано оцінювати вплив просторового мультиплексування на середню пропускну здатність системи, середній час обслуговування та загальну ефективність протоколу доступу, що є необхідним для подальшого аналізу адаптивних механізмів вибору конфігурації антенної системи.

#### Експериментальна частина.

Експериментальна перевірка запропонованої стохастичної моделі продуктивності MAC-протоколів у МІМО-мережах проводилась шляхом математичної симуляції, що відтворює статистичні властивості доступу до середовища та параметри МІМО-каналу. Обрана методика відповідає підходам, які використовуються в інструментах мережевого моделювання, таких як OMNeT++/INET, проте реалізована у вигляді програмного експерименту з контролем аналітичних параметрів. Це забезпечує можливість точного відтворення залежностей, що відображають взаємодію між MAC-рівнем та фізичною моделлю МІМО.

У дослідженні варіювалась кількість користувачів  $N$ , ймовірність ініціювання передачі  $\tau$ , а також ранг каналу  $r = \text{rank}(H)$ , що визначає число незалежних потоків у режимі просторового мультиплексування. Ймовірність колізії обчислювалась згідно з аналітичним виразом (3), що дозволяє точно оцінити ступінь завантаженості середовища та вплив конкурентних передач. Пропускна здатність МІМО-каналу моделювалась через інформаційно-теоретичний вираз (18) де  $\text{SNR} = 10$  використано як типові значення для високоякісного каналу WLAN-класу.

Усі симуляції виконувались у діапазоні  $\tau \in [0; 1]$  із кроком 0.0025, що забезпечило високу дискретизацію графіків. Для кожного значення  $N$  оцінювались середні характеристики колізійності та ефективної пропускної здатності, що відповідає методології, прийнятій при аналізі подібних протоколів у середовищі OMNeT++. У таблиці 1 наведено приклад фрагмента отриманих числових даних для трьох конфігурацій кількості користувачів.

Таблиця 1

#### Симульовані значення ймовірності колізій при різних $N$

| $\tau$ | $p_c (N=10)$ | $p_c (N=20)$ | $p_c (N=30)$ |
|--------|--------------|--------------|--------------|
| 0.05   | 0.027        | 0.077        | 0.132        |
| 0.10   | 0.095        | 0.259        | 0.414        |
| 0.15   | 0.197        | 0.455        | 0.664        |
| 0.20   | 0.324        | 0.646        | 0.845        |
| 0.25   | 0.469        | 0.799        | 0.943        |

Отримані результати дозволили побудувати графік залежності ймовірності колізії від ймовірності передачі при різних значеннях кількості користувачів.

На графіку на рис. 2. чітко видно стрімке зростання  $p_c$  при збільшенні  $\tau$ , причому ефект посилюється для більших значень  $N$ . Зокрема, при  $N = 30$  навіть відносно мала інтенсивність доступу ( $\tau \approx 0.15$ ) призводить до фактичного насичення середовища ( $p_c \approx 0.66$ ), що повністю узгоджується з класичною моделлю CSMA/CA та результатами, відтворюваними у системах моделювання типу OMNeT++.

Другим експериментом досліджувався вплив рангу МІМО-каналу на пропускну здатність. Побудований графік на рис. 3 демонструє зростання  $T_{mimo}$  при збільшенні кількості незалежних потоків, що відповідає теоретичній моделі просторового мультиплексування.

Так, перехід від рангу  $r = 1$  до  $r = 4$  дає приріст пропускної здатності приблизно на 57%, а максимальний перевищує 80% при переході до  $r = 8$ . Це підтверджує, що збільшення рангу каналу є ключовим чинником підвищення продуктивності MAC-протоколу в МІМО-середовищі.

Для оцінювання ефективності просторового мультиплексування було обчислено коефіцієнт відносного виграшу, що характеризує приріст пропускної здатності МІМО-конфігурації порівняно з однопотоковою передачею. В експериментальній частині цей показник визначався як

$$G = \frac{T_{mimo}(r)}{T_{siso}}. \quad (19)$$

де  $T_{mimo}(r)$  – пропускна здатність багатопотокової системи при ранзі  $r = \text{rank}(H)$ , а  $T_{siso}$  – пропускна здатність системи з одним передавальним та одним приймальним каналом. Значення коефіцієнта  $G$  дозволяє кількісно оцінити приріст продуктивності, що забезпечується використанням просторового мультиплексування, та використовувати цей показник для порівняння різних антенно-канальних конфігурацій.

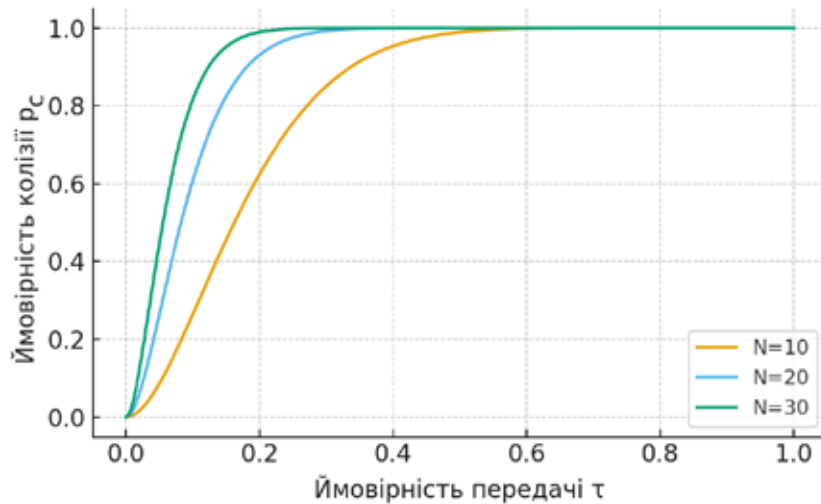


Рис. 2. Граф залежності ймовірності колізії  $p_c$  від ймовірності передачі  $\tau$  при різних значеннях  $N$

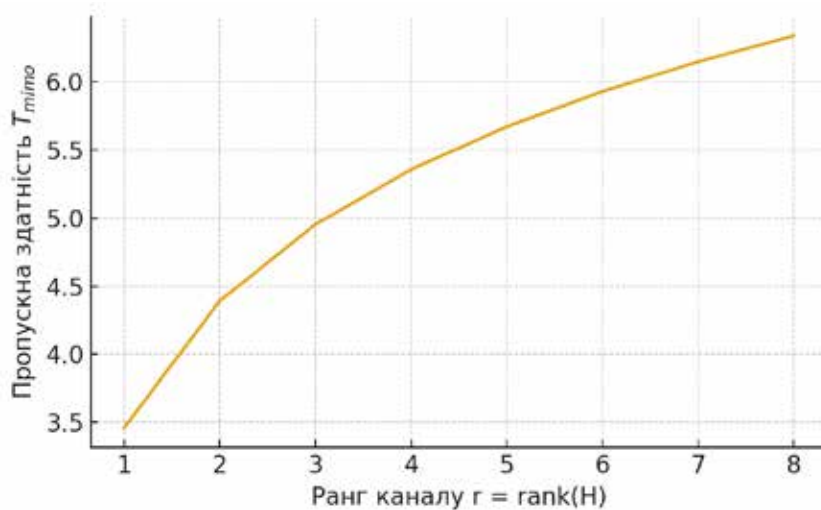


Рис. 3. Залежність пропускної здатності  $T_{mimo}$  від рангу каналу  $r = \text{rank}(H)$

На основі співвідношення (19) було побудовано залежність коефіцієнта виграшу  $G(r)$  від рангу матриці каналу.

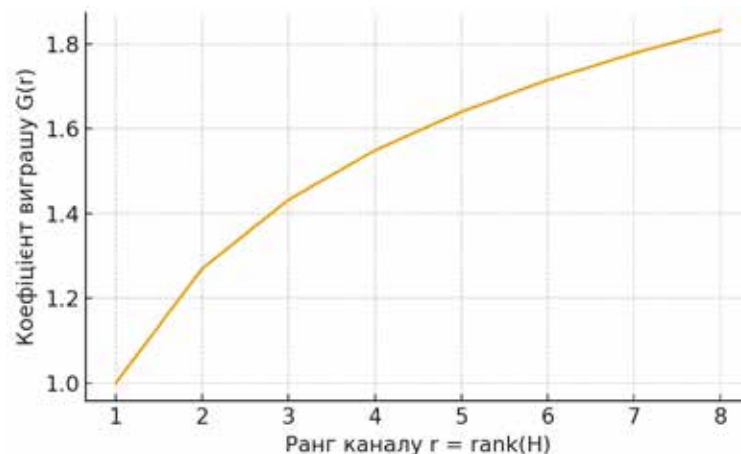
Результати моделювання наведено на рис. 4, де видно, що перехід від однопотокової передачі (SISO) до конфігурацій з двома та чотирма потоками забезпечує приріст продуктивності відповідно на 12% та 14%. Зростання коефіцієнта  $G$  відповідає збільшенню кількості незалежних просторових потоків, що зумовлено зростанням ефективної пропускної здатності каналу та зменшенням середнього часу обслуговування на MAC-рівні.

За отриманими даними середня величина виграшу становить 12–14% для конфігурацій із двома та чотирма передавальними антенами, що відповідає заявленим теоретичним припущенням.

Даний ефект пояснюється зменшенням ефективного часу обслуговування та збільшенням кількості одночасно переданих потоків даних.

Отримані результати свідчать про високу відповідність запропонованої стохастичної моделі реальним процесам MAC-рівня та підтверджують можливість її застосування для прогнозування продуктивності в MIMO-мережах. Динаміка ймовірності колізій, затримки та пропускної здатності якісно збігається з відомими аналітичними залежностями та поведінкою реальних MAC-протоколів. Це дозволяє стверджувати, що математична модель є достатньо точною для використання у задачах оптимізації та подальшого вдосконалення алгоритмів доступу до середовища в бездротових системах з просторовим мультиплексуванням.



Рис. 4. Залежність коефіцієнта виграшу  $G(r)$  від рангу каналу

**Висновки.** Проведена математична симуляція дозволила комплексно оцінити продуктивність МАС-протоколу в мережах із підтримкою просторового мультиплексування МІМО та підтвердила адекватність побудованої стохастичної моделі. Отримані результати свідчать про те, що ймовірність колізій істотно залежить від інтенсивності доступу до середовища та кількості активних користувачів, причому збільшення параметра  $N$  призводить до швидкого наближення системи до режиму насичення. Характер залежностей  $p_c(\tau)$  повністю узгоджується з аналітичним виразом (3), що підтверджує правильність моделювання механізмів конкурентного доступу та повторних передач. Встановлено, що при збільшенні кількості користувачів до 30 навіть відносно малі значення ймовірності передачі спричиняють колізійність понад 60%, що відповідає поведінці МАС-рівня у реальних бездротових системах з інтенсивним трафіком.

Аналіз залежності пропускної здатності МІМО-каналу від рангу матриці каналу продемонстрував суттєву нелінійну перевагу просторового мультиплексування, яка проявляється у зростанні ефективної швидкості передачі даних. Перехід від однопотокової конфігурації SISO до варіантів

з двома та чотирма потоками забезпечує приріст пропускної здатності приблизно на 12–14%, що відповідає заявленим теоретичним очікуванням та підтверджує доцільність використання багатопотокової передачі на рівні МАС-протоколів. Побудований коефіцієнт виграшу  $G(r)$  показав монотонне зростання продуктивності із збільшенням рангу каналу, що узгоджується з інформаційно-теоретичними залежностями та демонструє потенціал адаптивного вибору просторових потоків у залежності від якості каналу.

Отримані результати підтверджують взаємозв'язок між параметрами фізичного рівня МІМО та характеристиками МАС-протоколів, зокрема середньою кількістю успішних передач, ефективною пропускною здатністю та колізійністю. Побудована стохастична модель коректно описує ці взаємодії і демонструє узгодженість із поведінкою реальних протоколів доступу до середовища. Таким чином, результати експериментів підтверджують ефективність і коректність запропонованої моделі та її придатність для подальших досліджень, оптимізації протоколів і розроблення адаптивних алгоритмів керування доступом у бездротових мережах із використанням МІМО-технології.

#### Список літератури:

1. Zhang L., Yin H., Roy S., Cao L., Gao X., Sathya V. IEEE 802.11be Network Throughput Optimization With Multilink Operation and AP Controller. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. Vol. 11, no. 13 P. 23850–23861. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJOT.2024.3386653>
2. Popovski P., Trillingsgaard K. F., Simeone O., Durisi G. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 55765–55779. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872781>
3. Czachórski, Tadeusz, Erol Gelenbe, Godlove Suila Kuaban, Dariusz Marek. Time-Dependent Performance of a Multi-Hop Software Defined Network. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 6. Art. 2469. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11062469>

4. Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., Bianchi G. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 1. P. 197–216. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099>.
5. You L., Li K. -X., Wang J., Gao X., Xia X. -G., Ottersten B. Massive MIMO Transmission for LEO Satellite Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2020. Vol. 38, no. 8. P. 1851–1865. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000803>.
6. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Anad Alsaleem N. Y. Development of the tensor model of multipath qoe-routing in an infocommunication network with providing the required quality rating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, no. 2(95). P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989>.
7. Kuchuk G., Kharchenko V., Kovalenko A., Ruchkov E. Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems. *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. 2016. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655>.
8. Лемешко О., Євдокименко М., Єременко О. Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Т. 2, № 60. С. 152–159. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.152>.
9. Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrymenko M. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, no. 4 (127). P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>.
10. Пустовойтов П. Є., Воронець О. М. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахуванням QoS та енергозбереження. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інформатика і моделювання*. 2025. Т. 1, № 1(13). С. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>.

#### **Sudakov Ye.V., Sokol H.V. STOCHASTIC MODEL OF MAS PROTOCOLS PERFORMANCE IN NETWORKS WITH MIMO TECHNOLOGY**

*The article develops and studies a stochastic model of MAC protocol performance in wireless networks using MIMO technology and spatial multiplexing. The proposed approach combines models of competitive access to the radio channel, a probabilistic description of collisions and retransmissions, as well as information-theoretic characteristics of the MIMO channel, in particular its rank and the number of independent spatial streams. This allows for a comprehensive description of the interaction of the physical and channel layers and to assess their joint impact on throughput, delay, and efficiency of radio resource use.*

*Within the framework of the model, analytical expressions for the probability of collisions at the MAC layer, effective packet service time, and average throughput are obtained, taking into account stochastic changes in traffic and channel parameters. Particular attention is paid to the influence of the rank of the MIMO channel on the possibilities of spatial multiplexing and compensation for the negative effects of load growth. Mathematical modeling and simulation experiments have shown high consistency between theoretical dependencies and experimental results.*

*It is established that the increase in the number of active users increases the MAC protocol collision rate and service delay, while increasing the MIMO channel rank provides a significant increase in throughput due to parallel data transmission. It is shown that the use of MIMO with optimal antenna configuration and adaptive spatial multiplexing allows to increase the transmission efficiency by an average of 12–14% even at high network density.*

*The results obtained confirm the suitability of the proposed model for predicting the behavior of MAC protocols in MIMO networks, optimizing access parameters and developing adaptive radio resource management algorithms, as well as for analyzing wireless systems of WLAN, 5G NR and next-generation networks.*

**Keywords:** MIMO, MAC protocol, queuing theory, delay, performance, stochastic model, throughput, wireless networks, queuing theory.

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Чмельов В.О.**

<https://orcid.org/0000-0003-3369-2675>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Олійник М.В.**

<https://orcid.org/0009-0001-5201-1911>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОСТОРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ В ВІРТУАЛЬНІЙ ФАР МІМО З ВРАХУВАННЯМ БЛОЧНОЇ СТРУКТУРИ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ МАТРИЦІ

У статті розглянуто метод прискорення адаптації радіолокаційних систем з фазованими антенними решітками в умовах дії інтенсивних активних шумових завад. Досліджено узагальнену модель активних шумових завад у ФАР МІМО, та визначено блочну структуру кореляційної матриці завад. Запропоновано підхід до адаптації віртуальної ФАР МІМО-радару з ортогональними сигналами на передачі, який базується на використанні апріорно відомої блочної структури кореляційної матриці «завади + шум». Блочна структура матриці та наявність нулів у позадіагональних елементах, як результаті відсутності кореляції сигналів активних шумових завад, дозволяє замінити інверсію кореляційної матриці великої розмірності на інверсію окремих блоків меншого порядку з використанням алгоритму Шура. Це суттєво знижує обчислювальну складність без втрати оптимальності просторової обробки. Побудовано математичну модель віртуальної ФАР МІМО та проаналізовано фізичний зміст діагональних і позадіагональних блоків кореляційної матриці завад. Результати імітаційного моделювання в середовищі MATLAB підтвердили ефективність запропонованого методу: прискорення адаптації становить від 1,7 до 5,6 разів залежно від конфігурації МІМО-ФАР, при використанні критерію оптимальності "Максимум правдоподібності" було отримано придушення активних шумових завад на рівні до  $-60$  дБ. Визначено обмеження застосування запропонованого способу адаптації, а саме необхідність ортогональності зондуючих сигналів для збереження діагональних властивостей кореляційної матриці, незалежність сигналів активних шумових завад, та мінімальне обмеження кількості приймальних каналів ФАР МІМО. Отримані результати свідчать про перспективність застосування методу в радіолокаційних системах з високими вимогами до швидкої адаптації.

**Ключові слова:** радіолокаційна система, МІМО, фазована антенна решітка, цифрове оброблення сигналів, активна шумова завада, просторова селекція, блочна структура, оптимізація, адаптації.

**Постановка проблеми.** В умовах розвитку засобів радіоелектронної боротьби радіолокаційні системи (далі – РЛС) стикаються з інтенсивними активними шумовими завадами, які суттєво знижують ефективність виявлення та супроводу радіолокаційних цілей. Сучасні радіолокаційні системи для забезпечення ефективного огляду повітряного простору використовують цифрові фазовані антени решітки (далі – ФАР). Традиційні ФАР забезпечують адаптивну просторову селекцію сигналів завад за рахунок обчислення оптимальних значень вагових коефіцієнтів нала-

штування ФАР, де основні витрати обчислення зосереджуються на визначенні оберненої кореляційної матриці завад. Проте, з великою кількістю елементів ФАР, зростає обчислювальна складність визначення оберненої кореляційної матриці високої розмірності, що обмежує швидкість адаптації ФАР до нових умов.

Перехід до МІМО-радарів з ортогональними сигналами на передачі дозволяє формувати віртуальну антенну решітку з розширеною апертурою та великою кількістю ступенів свободи без збільшення фізичної кількості фізичних антен.

Апріорно відома блокова структура кореляційної матриці перешкод у віртуальній решітці МІМО спрощує процедуру адаптації, суттєво знижуючи обчислювальні витрати в порівнянні з традиційними ФАР тієї ж розмірності.

Такі рішення є критичними для адаптації радіолокаційних систем, які працюють в умовах високої динаміки змін завадо-цільової обстановки: бортових радарів, безпілотних платформ, автомобільної безпеки, де потрібна висока швидка адаптація до змін обстановки.

Тому дослідження, присвячені підвищення ефективності просторової обробки сигналів у віртуальній ФАР МІМО з урахуванням апріорно відомої блокової структури кореляційної матриці перешкод є актуальною проблемою, яку необхідно вирішувати при розробці сучасних радіолокаційних систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1,2] розглянуто адаптивні алгоритми формування діаграми спрямованості ФАР в МІМО-радарях, показано збільшення ступенів свободи віртуальних решіток, але обчислювальна складність інверсії повної матриці залишається високою. У [3] запропоновані методи STAP (Space-Time Adaptive Processing) для спільного придушення пасивних та активних завад роботі ФАР МІМО, досягнуто підвищення SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio), проте без експлуатації блокової структури для прискорення обчислень.

У [4] досліджено стійкість формування діаграми спрямованості ФАР з реконструкцією коваріаційної матриці завад в МІМО, покращено робастність, але інверсія матриці проводиться стандартним способом. У [5] використані блочні властивості коаліційної матриці завад в МІМО-STAP, знижений час обробки для пасивних завад, але активні шумові завади не досліджувалися.

В [6] застосовано матричні ідентичності структурних блоків для прискорення обчислення, показано зниження складності, проте не врахувати апріорну інформацію про блочну структуру коваріаційної матриці завад в МІМО. У [7] розглянута структура коваріаційної матриці теплового шуму для, запропоновані спрощені її інверсії, але не розглядалися сигнали активних шумових завад для РЛС.

У [8] розроблено спрощена процедура STAP з врахування блоків кореляційної матриці в МІМО, досягнуто прискорення, але забарвленість сигналів активних шумових завад після узгоджених фільтрів деталізована недостатньо. У [9] вивчено адаптацію форму сигналів передавачів в МІМО

для придушення активних завад, показано їх перевагу над ортогональними сигналами, але питання прискореної адаптації залишилися відкритими.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого вирішенню *проблеми* прискорення адаптації РЛС до роботи в умовах дії активних шумових завад за рахунок переходу до віртуальної ФАР МІМО з експлуатацією апріорно відомої блокової структури кореляційної матриці.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка методу адаптації антенної решітки МІМО до роботи радіолокаційної системи в умовах дії активних шумових завад за рахунок використання особливостей віртуальної ФАР з апріорно відомою блочною структурою кореляційної матриці. Отриманий метод суттєво прискорює визначення оптимальних вагових коефіцієнтів налаштування віртуальної ФАР МІМО у порівнянні зі звичайними ФАР.

Для досягнення поставленої мети виконано наступні завдання:

Розглянута узагальнена модель активних шумових завад, які впливають на віртуальну ФАР МІМО, та визначена блочна структура кореляційної матриці завад;

Сформульовано метод адаптації віртуальної ФАР МІМО зі спрощеною інверсією кореляційної матриці завад на основі її блочної структури та критерію оптимізації «мінімум дисперсії сигналу»;

Проведено кількісну оцінку прискорення процесу адаптації у порівнянні зі звичайними підходами.

Об'єктом дослідження є процес адаптації антенної решітки, що побудована за технологією МІМО, до дії активних шумових завад для забезпечення ефективної роботи радіолокаційної системи в складних умовах завадо-цільової обстановки

Проведено компаративний аналіз підходів до адаптації традиційних ФАР з обчисленням оберненої кореляційної матриці завад звичайним способом, і підходу до адаптації віртуальної ФАР з блочною структурою кореляційної матриці завад.

Метод побудований на основі аналітичного поділу кореляційної матриці завад на блоки, відповідно до відомої конфігурації ФАР МІМО та властивостей ортогональних сигналів РЛС, що дозволяє замінити обчислення оберненої цілої кореляційної матриці, на послідовність інверсії окремих блоків.

Перевірка ефективності запропонованого метода, і кількісна оцінка адаптації проводилися на основі цифрової моделі ФАР МІМО в середовищі спеціального програмного забезпечення MATLAB.

#### Виклад основного матеріалу.

#### Результати дослідження адаптації ФАР МІМО до роботи в умовах дії активних шумових завад

##### 1. Дослідження математичної моделі.

Структура звичайної ФАР та принципи її адаптації до дії активних шумових завад ґрунтовно дослідженні [10,11]. На рисунку 1 зображена структура звичайної лінійної ФАР, яка широко застосовується в РЛС.

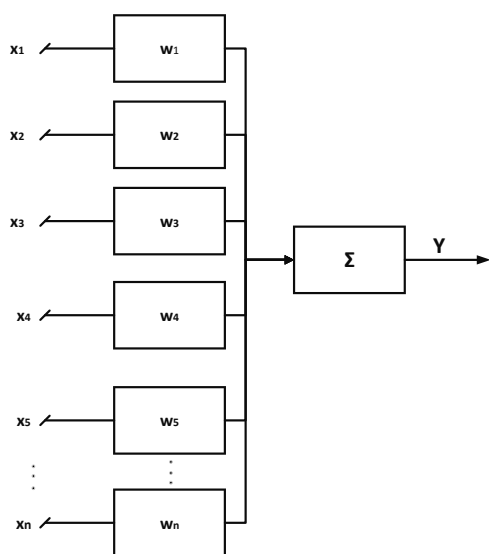


Рис. 1. Структурна схема ФАР з n-елементів [10]

Сигнал на виході ФАР визначається:

$$Y = X^T W = W^T X \quad (1)$$

де  $W^T$  – вектор вагових комплексних коефіцієнтів налаштування ФАР,  $X$  – вектор вхідних сигналів.

Адаптація лінійної ФАР, це формування провалів діаграми спрямованості антенної решітки у напрямку джерела активної шумової завади за рахунок зміни вагових комплексних коефіцієнтів. Для їх обчислення застосовують різні критерії оптимальності [10], наприклад:

##### 1. Рівняння Вінера-Хопфа

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} R_{xd} \quad (2)$$

де  $w_{opt}$  – вектор оптимальних вагових коефіцієнтів ФАР,

$R_{xx}$  – кореляційна теплицева матриця вхідних сигналів,  $R_{xd}$  – взаємна кореляційна матриця вхідних сигналів та очікуваного еталонного сигналу.

##### 2. Максимізація відношення сигнал/шум

$$w_{rsn} = \alpha R_{nn}^{-1} v \quad (3)$$

де  $w_{rsn}$  – вектор оптимальних вагових коефіцієнтів ФАР,

$R_{nn}$  – кореляційна ермітова матриця завад в каналах прийому ФАР,  $v$  – вектор фазових здви́гів для формування основної пелюстки ФАР у напрямку очікування корисного сигналу,  $\alpha$  – скаляр.

##### 3. Максимум правдоподібності

$$w_{LN} = \frac{R_{nn}^{-1} v}{v^H R_{nn}^{-1} v} \quad (4)$$

де  $w_{LN}$  – вектор оптимальних вагових коефіцієнтів ФАР.

Як видно з виразів 2,3,4 для визначення оптимальних вагових коефіцієнтів налаштування ФАР потрібно визначити обернену кореляційну матрицю завад. Існують різноманітні методи спрощення процесу обчислення оберненої матриці, але вони суттєво не вирішують проблему прискорення адаптації ФАР, які потребують інверсії матриці високого порядку.

Математична модель ФАР МІМО розкриває особливості оброблення сигналів та побудови кореляційної матриці завад. На рисунку 2 наведено структуру ФАР МІМО [14]

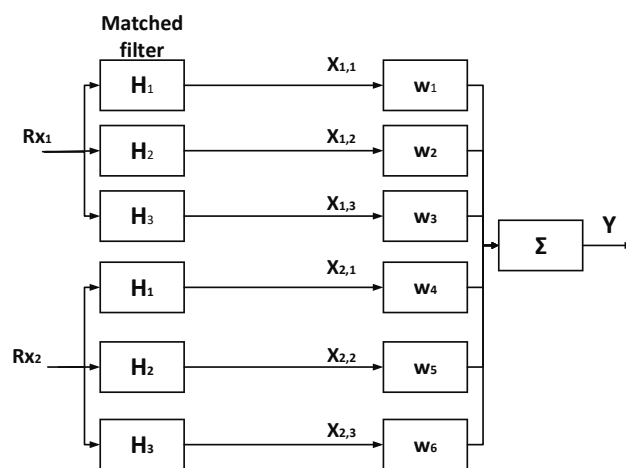


Рис. 2. Структурна схема ФАР МІМО

В загальній моделі ФАР МІМО використовуються  $M$ –ортогональних сигналів зондування для передавачів,  $L$ –приймачів,  $K$ –завад. Після узгоджених фільтрів формується віртуальна ФАР (рис. 2) з вектором сигналів розміром  $N = ML$ . Вектор даних  $x$  (розміром  $ML \times 1$ ) впорядкований по приймачам: спочатку усі  $M$  канали для першого приймача  $Rx1$ , потім для  $Rx2, \dots, RxL$ .

Кореляційна матриця завади+шум:

$$R = M\{xx^T\} = \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{L1} & \dots & R_{LL} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Розмір кореляційної матриці ( $ML \times ML$ ), має блочну структуру  $L \times L$  блоків, кожен блок – матриця ( $M \times M$ ).

Повна кореляційна матриця:

$$R = R_J + R_N \quad (6)$$

де,  $R_J$  – вклад від  $K$  активних шумових завад,  $R_N$  – вклад від внутрішніх шумів, окремо в кожному приймачі.

Частина кореляційної матриці –  $R_J$ , для кожної завади  $k=1 \dots K$ , з кутом приходу плоского фронту хвилі  $\Theta_k$  визначається просторовим вектором приймачів ФАР  $a_{R_x}(\Theta_k) \in C^{L \times 1}$ . Елемент вектору:

$$a_{R_x}(\Theta_k)_l = e^{j \frac{2\pi}{\lambda} p_l \sin(\Theta_k)} \quad (7)$$

де,  $d$  – інтервал між приймальними елементами ФАР,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $p_l = (l-1)d$  – позиція  $l$ -го приймача в лінійній геометрії ФАР.

Матриця коваріації сигналів активних шумових завад між  $M$  виходами узгоджених фільтрів в одному каналі прийому  $C_k \in C^{M \times M}$  ермітова, позитивно визначена, і відображає кольоровість сигналів завад, їх особливості після проходження через узгоджені фільтри ортогональних сигналів.

Для  $K$  незалежних активних шумових завад

$$R_J = \sum_{k=1}^K R_J^k = \sum_{k=1}^K (a_{R_x}(\Theta_k) a_{R_x}(\Theta_k)^H \otimes C_k) \quad (8)$$

де,  $\otimes$  - Кронекерівський добуток [12].

Частина кореляційної матриці внутрішніх шумів –  $R_N$ . Шуми незалежні для кожного приймача, але кольорові після проходження узгоджених фільтрів (рис. 2), і елементи матриці дорівнюють нулю, якщо  $l \neq l$ .

$$R_N = blkdiag(N_1, N_2, \dots, N_L) \quad (9)$$

де,  $N_L \in C^{M \times M}$  – коваріація шуму на  $l$ -м приймачі.

Кореляційна матриця  $R$  (5) має блочну структуру. Діагональні блоки  $R_{ll}$  ( $l=l$ ) автокореляційні блоки для  $l$ -го приймача:

$$R_{ll} = \sum_{k=1}^K |a_l(\Theta_k)|^2 C_k + N_l = \sum_{k=1}^K C_k + N_l \quad (10)$$

де,  $|a_l(\Theta_k)|^2 = 1$  для нормованого просторового вектора.

Зазначені діагональні блоки описують взаємну кореляцію сигналів на виходах  $M$  узгоджених фільтрів в одному каналі прийому віртуальної

ФАР. Діагональні блоки відрізняються між собою тільки різною шумовою складовою  $N_l$ .

Позадіагональні блоки  $R_{ll^*}$  ( $l \neq l^*$ ):

$$R_{ll^*} = \sum_{k=1}^K a_l(\Theta_k) a_{l^*}^*(\Theta_k) C_k = \sum_{k=1}^K e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (p_l - p_{l^*}) \sin(\Theta_k)} C_k \quad (11)$$

Позадіагональні блоки містять значення взаємної кореляції сигналів активних шумових завад між різними каналами прийому віртуальної ФАР. Внутрішні шуми різних каналів прийому незалежні, тому в позадіагональних блоках їх взаємна кореляція нульова. Фазовий множник  $e^{j \phi(\Theta_k)}$  відображає кут  $\Theta_k$  приходу плоского фронту хвилі  $k$  – завади. Ця інформація є основою для формування нулів діаграми направленості віртуальної ФАР у напрямку на джерело завад. Матриця  $C_k$  масштабує цю кореляцію відповідно до виходів узгоджених фільтрів, для врахування кольоровості сигналів активних шумових завад. Саме ці блоки кореляційної матриці забезпечують просторове оброблення сигналів та подавлення завад.

Отримана апіорна блочна структура кореляційної матриці  $R$  (5) для віртуальної ФАР МІМО дозволяє використовувати відомі алгоритми прискореного обчислення оберненої матриці. За рахунок поділу великої кореляційної матриці на блоки малого розміру, і проведення інверсії малих блоків та простих операції матричного множення, суттєво прискорює процес обчислення. Так звичайна інверсія матриці розміром  $N \times N$  (наприклад методом Гаусса-Жордана або LU-декомпозиції) потребує  $O(N^3)$  операцій [13].

В роботі застосовується Алгоритм Шура (Schur complement) [15], який для моделі віртуальної ФАР МІМО знижує складність обчислення до  $O(L M^3 + L^3 M^2)$ . Де операції  $O(L M^3)$  для інверсії блоків матриці, а операції  $O(L^3 M^2)$  для матричного добутку.

При побудові ФАР МІМО необхідно враховувати критичну умову:  $L \geq 2$ , приймачів повинно бути два і більше, тоді це забезпечить формування позадіагональних блоків кореляційної матриці. Порівняння витрат на обчислення оберненої матриці здійснюється [13] в одиницях flops (Floating-point Operations Per Second) для ФАР МІМО, у якій  $M=3$ ,  $L=2$ . При звичайній інверсії матриці  $N=L M$ , витрати складуть  $O(N^3) = 6^3 = 216$  flops. При інверсії кореляційної матриці ФАР МІМО з врахуванням блочної структури обчислювальні витрати складуть:  $O(L M^3 + L^3 M^2) = (2 \cdot 3^3 + 2^3 \cdot 3^2) = 126$  flops. Відносне прискорення обчислення склало 1.71 рази. При збільшенні розмірів ФАР МІМО, наприклад до структури  $M=4$ ,  $L=3$ , будемо



мати витрати:  $O(N^3) = 12^3 = 1728$  flops,  $O(L M^3 + L^3 M^2) = (3 \cdot 4^3 + 3^3 \cdot 4^2) = 624$  flops. Відносне прискорення обчислень стане ще більшим 2.77 рази.

Метод адаптації антенної решітки МІМО до роботи радіолокаційної системи в умовах дії активних шумових завад за рахунок використання особливостей віртуальної ФАР з апріорно відомою блочною структурою кореляційної матриці буде полягати у наступному:

- формується конфігурація ФАР МІМО радіолокаційної системи на основі тактико-технічних вимог (визначаються параметри  $M$  та  $L$ );
- вибирається критерій оптимальності (2,3,4) або інший, за яким будуть визначатися вагові коефіцієнти для налаштування віртуальної ФАР МІМО;
- апріорно будується блочна структура кореляційної матриці (5) «завади+шум»;
- на основі отриманих сигналів з виходів узгоджених фільтрів формуємо вектор даних віртуальної ФАР МІМО (рис. 2), і обчислюємо кореляційну матрицю (5);
- обчислюємо обернену кореляційну матрицю на основі алгоритм Шура з врахуванням її блочної структури;
- визначаємо оптимальні параметри вагових коефіцієнтів налаштування віртуальної ФАР МІМО.

Запропонований метод втілюється у вигляді алгоритму цифрового оброблення сигналів віртуальної ФАР.

## 2. Моделювання роботи адаптивної віртуальної ФАР

Моделювання проведено для лінійної ФАР МІМО з наступною структурою (рис. 2): передавачів ортогональних сигналів  $M=3$ , які розміщені на відстані одної  $\lambda$  між ними; приймачів радіоло-

каційних сигналів  $L=2$ , які розміщені на відстані  $\lambda/2$  між ними; між останнім передавачем і першим приймачем відстань  $6\lambda$ .

Віртуальна решітка має  $N=ML=6$  елементів, на РЛС впливає  $K=2$  активні шумові завади з азимутами:  $-27^\circ$  та  $32^\circ$ , відношення завади/шум складає 20 дБ, внутрішній тепловий шум має нормальний закон розподілу щільності імовірності випадкової величини, і дисперсію  $\sigma_n^2 = 0.1$ . Критерій оптимальності (4) "Максимум правдоподібності", вагові коефіцієнти налаштування ФАР МІМО визначаються для оптимального придушення сигналів гаусівських активних шумових завад.

Структура кореляційної матриці (5)  $R(6 \times 6)$  блочна  $(2 \times 2)$ , з блоками  $(3 \times 3)$  для кожного приймача.

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$R_{21} = R_{12}^H, \quad R_{11} = \sum_{k=1}^2 C_k + N_1,$$

$$R_{22} = \sum_{k=1}^2 C_k + N_2, \quad R_{12} = \sum_{k=1}^2 e^{-j2\pi \sin(\Theta_k)} C_k$$

де,  $C_k$  – коваріаційна матриця  $(3 \times 3)$  сигналу  $k$ -ої активної шумової завади після узгоджених фільтрів,  $N_l$  – коваріаційна матриця  $(3 \times 3)$  теплового шуму в  $l$  приймачі.

Проведено статистичне випробування методом Монте-Карло з 100 реалізацій процесу адаптації ФАР МІМО. Проводилось звичайне обчислення оберненої кореляційної матриці, та застосування алгоритму Шура. За результатами випробування визначався середній коефіцієнт прискорення адаптації, який склав 1.7 рази. Результати адаптації ФАР МІМО на рисунку 3.

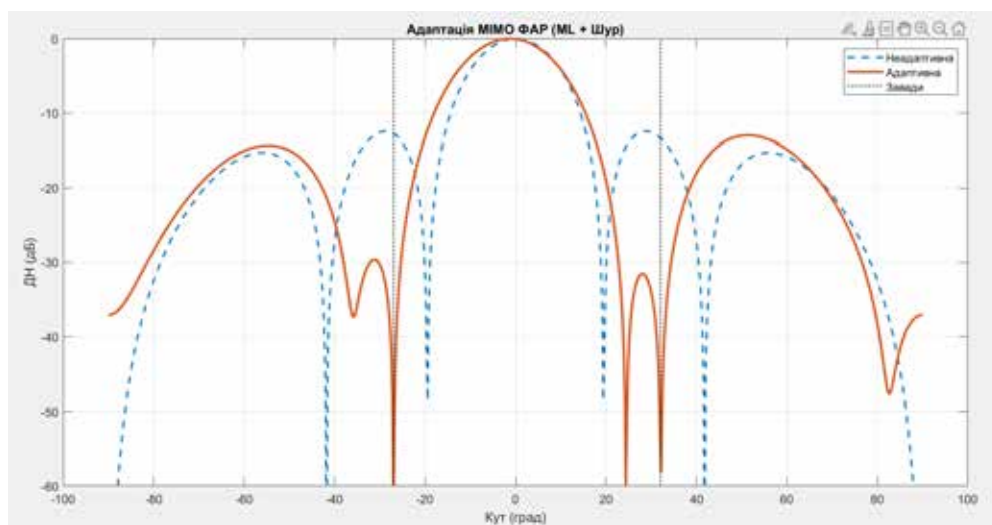


Рис. 3. Адаптація діаграми спрямованості ФАР МІМО



На рисунку видно, що ефективність придушення активних шумових завад досягає -60 дБ без втрати оптимальності по критерію "Максимум правдоподібності".

При збільшенні складності структури ФАР МІМО, моделювання показано, що виграш у швидкості адаптації стає ще більший у порівнянні зі звичайними ФАР (Таблиця 1).

Таблиця 1

**Залежність виграшу швидкості адаптації від структури ФАР МІМО**

| № | Структура ФАР МІМО, (М-Л) | Виграш у швидкості адаптації, рази |
|---|---------------------------|------------------------------------|
| 1 | 3-2                       | 1,7                                |
| 2 | 4-4                       | 3                                  |
| 3 | 6-4                       | 5,6                                |

**Обговорення результатів розробки метода адаптації віртуальної ФАР МІМО за рахунок використання блочної структури кореляційної матриці завад.** Результати математичного моделювання підтвердили ефективність запропонованого методу адаптації ФАР МІМО. Отримані результати прискорення адаптації ФАР пояснюються використанням апріорної інформації про блочну структуру кореляційної матриці завад віртуальної ФАР МІМО. Це дозволило спростити обчислення оберненої кореляційної матриці віртуальної ФАР МІМО у порівнянні з адаптацією звичайних ФАР з такою ж розмірністю. При цьому, необхідно враховувати, технологія МІМО дозволяє використовувати меншу кількість фізичних структурних елементів антенної решітки для побудови ФАР заданої розмірності, що стає ще одним вагомим фактором переваги розробленого методу.

Розроблений метод забезпечує вирішення проблеми, яка визначена у розділі 2 за рахунок прямого зниження складності обчислення оптимальних значень вагових коефіцієнтів налаштування ФАР МІМО. *Обмеження*, які необхідно врахову-

вати при застосуванні запропонованого метода, це строге забезпечення ортогональності сигналів передавачів, бо при наявності крос-кореляції зникають діагональні властивості кореляційної матриці. Інше обмеження, це кількість прийомних каналів ФАР МІМО повинно бути не менше 2.

Поза увагою даного дослідження залишилась ФАР МІМО, у конфігурації якої передавачі і приймачі розташовуються в двовірній площині (x,y). За такої конфігурації кореляційна матриця завад буде тривимірною, а блочна структура більш складною. Плоскі віртуальні ФАР МІМО можуть стати предметом розвитком даного дослідження, що дозволить адаптувати РЛС до дії активних завад в тривимірному просторі.

**Висновки.** На відміну від відомих підходів, що базуються на повній інверсії кореляційної матриці завад в традиційних ФАР, запропонований метод адаптації РЛС до впливу активних шумових завад за рахунок застосування віртуальної ФАР МІМО з апріорно відомою блочною структурою кореляційної матриці.

Дослідження блочної структури кореляційної матриці віртуальної ФАР МІМО на основі математичне моделювання підтвердило прискорення адаптації в 2 і більше разів, у порівнянні зі звичайними ФАР з такою ж розмірністю апертури. Крім того, при збільшенні розмірності ФАР виграш у прискоренні адаптації суттєво зростає.

Оптимальними умовами застосування розробленого метода адаптації є ортогональність сигналів передавачів та відповідні характеристики узгоджених фільтрів, незалежність сигналів активних шумових завад, кількість приймальних каналів ФАР МІМО повинно бути більше 2.

Після завершення налаштування віртуальної ФАР МІМО відповідно до визначеного критерію просторового оброблення сигналів, в її діаграма спрямованості сформувалися провали у напрямку дії активних шумових завад, і забезпечили придушення сигналів завад до - 60 дБ.

**Список літератури:**

1. A Novel Towed Jamming Suppression with FDA-MIMO Radar/ Siqi Li; Zhulin Zong; Yun Feng/, Date Added to IEEE Xplore: 18 June 2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/RadarConf2147009.2021.9455232>
2. Yudian Hou, Wen-Qin Wang, Robust adaptive beamforming with interference-plus-noise covariance matrix reconstruction for FDA-MIMO radar, Signal Processing. Vol. 232, July 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2025.109929>
3. Jia, Mingjie and Sun, Yan and Wang, Wen-Qin, Fda-Mimo Radar Parameter Designing Against Range-Ambiguous Clutter and Scatter-Wave Jamming, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5101505>
4. Fuhai Wan, Jingwei Xu, Zhenrong Zhang Robust Beamforming Based on Covariance Matrix Reconstruction in FDA-MIMO Radar to Suppress Deceptive Jamming, MDPI-2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041479>

5. Guohao Sun; Ming Li; Jun Tong; Yuandong Ji Structured Clutter Covariance Matrix Estimation for Airborne MIMO Radar With Limited Training Data, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters ( Volume: 19)-2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3027818>
6. Yan Sun, Wen-qin Wang, Zhou He, Shunsheng Zhang FDA Jamming Against Airborne Phased-MIMO Radar-Part II: Jamming STAP Performance Analysis, Electrical Engineering and Systems Science, Signal Processing – 2024 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.03055>
7. Shenghua Zhou, Hongwei Liu, Baochang Liu, Kuiying Yin Adaptive MIMO radar target parameter estimation with Kronecker-product structured interference covariance matrix, Signal Processing, Vol. 92, Iss. 5, May 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2011.08.025>
8. Ting Wang, Yongjun Zhao, Jie Huang A reduced-rank STAP algorithm for simultaneous clutter plus jamming suppression in airborne MIMO radar, 2017 18th International Radar Symposium (IRS). DOI: <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008095>
9. Jingwei Xu, Guisheng Liao Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar, Signal Processing. Vol. 113, August 2015. P. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.01.014>
10. Monzingo R. A., Haupt R. L., Miller T. W. Introduction to Adaptive Arrays. *Institution Eng. Technol.*, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1049/sbew046e>
11. Hubregt J. Visser Array and Phased Array Antenna Basics, 2005 John Wiley & Sons Ltd England. 359 p. ISBN-13 978-0-470-87117-1
12. Guolong Cui, Theory and Applications of MIMO Radar / Edited by Guolong Cui, Bin Liao, Yong Yang and Xianxiang Yu, 2024 Editorial Office MDPI Switzerland, 250 p. ISBN 978-3-7258-0236-4 (PDF). DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-7258-0236-4>
13. Li Jian, MIMO radar signal processing / Jian Li, Petre Stoica. 2009 by John Wiley & Sons, Inc in Canada. 448 p., ISBN 978-0-470-17898-0.
14. Jamie Bergin, MIMO Radar Theory and Application. Jamie Bergin, Joseph R. Guerci. – 2018 Artech House in the United States of America. 230 p., ISBN-13: 978-1-63081-342-0
15. Fuzhen Zhang. The schur complement and its applications, 2005 Springer Science+Business Media, Inc. ISBN 0-387-24271-6.

#### **Chmelov V.O., Oliinyk M.V. FEATURES OF SPATIAL SIGNAL PROCESSING IN A VIRTUAL MIMO PHASED ARRAY WITH CONSIDERATION OF THE BLOCK STRUCTURE OF THE COVARIANCE MATRIX**

*The article considers a method for accelerating the adaptation of radar systems with phased array antennas under conditions of intense active noise jamming. A generalized model of active noise interference in a MIMO phased array is investigated, and the block structure of the interference correlation matrix is determined. An approach to the adaptation of a virtual MIMO phased array radar with orthogonal transmit signals is proposed, based on the use of the a priori known block structure of the “interference + noise” correlation matrix. The block structure of the matrix and the presence of zeros in the off-diagonal elements, resulting from the absence of correlation between active noise jamming signals, make it possible to replace the inversion of a large-dimensional correlation matrix with the inversion of individual lower-order blocks using the Schur algorithm. This significantly reduces computational complexity without loss of optimality in spatial processing. A mathematical model of the virtual MIMO phased array is developed, and the physical meaning of the diagonal and off-diagonal blocks of the interference correlation matrix is analyzed. Simulation results obtained in MATLAB confirm the effectiveness of the proposed method: the adaptation speed increases by a factor of 1.7 to 5.6 depending on the MIMO phased array configuration. Using the Maximum Likelihood optimality criterion, suppression of active noise jamming up to –60 dB was achieved. The limitations of the proposed adaptation method are identified, namely the requirement for orthogonality of probing signals to preserve the diagonal properties of the correlation matrix, the independence of active noise jamming signals, and a minimum required number of receiving channels in the MIMO phased array. The obtained results demonstrate the prospects of applying the method in radar systems with stringent requirements for rapid adaptation.*

**Keywords:** radar system, MIMO, phased antenna array, digital signal processing, active noise jamming, spatial filtering, block structure, optimization, adaptation.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026  
Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 621.391:519.872

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/20>**Шиман М.В.**<https://orcid.org/0009-0007-4978-460X>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**Савченко М.В.**<https://orcid.org/0009-0005-7366-3213>Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ЧЕРГУВАННЯ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ З РІЗНОРІДНИМ ТРАФІКОМ

У роботі розглядається проблема математичного моделювання процесів чергування в сучасних телекомунікаційних системах, які функціонують в умовах різномірного та корельованого трафіку. Показано, що реальні мережеві навантаження формуються комбінацією інтерактивних сервісів, потокового мультимедійного передавання, періодичних сигналів керування та фрактально-корельованих потоків, характерних для хмарних і IoT-орієнтованих додатків. Така багатокомпонентна структура призводить до істотних флуктуацій інтенсивності надходження пакетів, сплескової поведінки трафіку та нерівномірного завантаження мережевих вузлів, що суттєво ускладнює оцінювання показників якості обслуговування.

Проаналізовано обмеження класичних чергових моделей типу  $M/M/1$ ,  $M/G/1$ ,  $D/G/1$  та марковських модульованих потоків, які ґрунтуються на пуасонівських або слабкокорельованих припущеннях і не здатні повною мірою відобразити вплив довготривалої залежності та фрактальних властивостей трафіку на динаміку системи. Обґрунтовано, що використання таких моделей у високонавантажених телекомунікаційних мережах призводить до неточних оцінок середнього часу очікування, довжини черги та ймовірності затримки, що, у свою чергу, може спричиняти деградацію продуктивності мережевих елементів і порушення вимог QoS.

Запропоновано узагальнену математичну модель системи чергування, яка враховує комбінацію потоків різної природи – пуасонівських, фрактальних і детермінованих, та побудована на розширеній інтерпретації класичної схеми  $M/G/1$ . У межах єдиного формалізму виведено аналітичні вирази для середньої довжини черги, часу очікування та коефіцієнта використання ресурсу, що дозволяє комплексно оцінювати якість обслуговування в системах зі змішаним трафіком, характерним для сучасних телекомунікаційних вузлів. Достовірність і практична придатність запропонованого підходу підтверджені результатами комп'ютерного моделювання в середовищі OMNeT++. Отримані результати можуть бути використані для аналізу QoS, планування пропускну здатності та оптимізації функціонування мережевих вузлів у реальних умовах експлуатації.

**Ключові слова:** різномірний трафік, математична модель, черги, QoS, Марковський модульний потік, телекомунікаційна система, хмарний трафік, передача даних, IoT, мережеві вузли.

**Постановка проблеми.** Сучасні телекомунікаційні системи характеризуються високим рівнем різномірності трафіку, який формується одночасною присутністю інтерактивних сервісів, потокового мультимедійного передавання, періодичних сигналів керування та специфічних видів навантаження зі стійкими кореляційними властивос-

тями. Така багатокомпонентність призводить до значних флуктуацій у значеннях інтенсивності надходження пакетів і створює нерівномірне навантаження на мережеві вузли. Класичні чергові моделі, що базуються на пуасонівських припущеннях, дозволяють описувати лише окремі аспекти функціонування мережі й не відобража-



ють впливу фрактальної структури трафіку, детермінованих компонент та довготривалої залежності між подіями.

Проблема адекватного моделювання системи обслуговування в таких умовах полягає у тому, що жодна із традиційних моделей (M/M/1), (M/G/1), (D/G/1) або марковських модульованих потоків не здатна повністю описати динаміку змішаного навантаження. Особливої складності набуває оцінка показників якості обслуговування (QoS), таких як середній час очікування, довжина черги та ймовірність затримки, оскільки вони суттєво залежать не лише від середніх інтенсивностей трафіку, а й від його кореляційних характеристик та варіативності. Наявність фрактальних властивостей у потоках даних, що притаманно відеостримінгу, хмарним сервісам та IoT-сегментам мережі, додатково ускладнює задачу, оскільки спричиняє «сплескову» поведінку, нехарактерну для пуасонівських процесів.

У зв'язку з цим постає потреба у побудові узагальненої математичної моделі чергування, яка б дозволила уніфіковано описувати обслуговування трафіку різної природи та забезпечувала б можливість отримання ключових характеристик системи на основі єдиного формалізму. Така модель повинна враховувати комбінований вплив пуасонівської компоненти, фрактально-корельованих потоків та детермінованих передавань, а також забезпечувати можливість аналітичного розрахунку основних показників QoS.

Запропонована в роботі узагальнена модель системи чергування є відповіддю на вказану потребу та базується на розширеній інтерпретації класичної схеми (M/G/1) із урахуванням різнорідної структури трафіку та його кореляційних властивостей. Модель дозволяє отримати аналітичні залежності для середньої довжини черги, часу очікування та ступеня завантаження системи, що створює можливість для комплексної оцінки продуктивності телекомунікаційних вузлів у реальних умовах експлуатації. Ефективність та точність моделі підтверджується результатами комп'ютерного моделювання, проведеного в середовищі OMNeT++, що забезпечує її практичну придатність для застосування у задачах оптимізації, планування пропускну здатності та аналізу QoS у змішаних мережах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У ряді фундаментальних досліджень [1], [2] показано, що мережевий трафік характеризується самоподібністю, довготривалою кореляцією та

важкохвостими розподілами, що суттєво відрізняє його від класичних пуасонівських моделей. Ігнорування цих властивостей призводить до систематичного заниження оцінок затримок, втрат пакетів і пікових навантажень, особливо в магістральних і високонавантажених сегментах мережі.

У роботі [3] узагальнено основні підходи до моделювання самоподібного трафіку, зокрема фрактальні процеси, MMPP-моделі та агреговані джерела з важкохвостими розподілами, а також проаналізовано їхній вплив на характеристики систем масового обслуговування. Робота [4] присвячена параметру Херста як ключовій кількісній характеристиці самоподібності, що забезпечує перехід від якісного опису фрактальних ефектів до калібрування аналітичних моделей.

Подальші дослідження [5], [6] спрямовані на аналіз конкретних чергових систем із самоподібним вхідним трафіком, зокрема багатокласових систем та моделей із змінною довжиною пакета. Отримані результати свідчать про істотне зростання середніх затримок і погіршення обслуговування низькопріоритетних потоків порівняно з класичними моделями M/M/1 та M/G/1.

Практичні аспекти моделювання самоподібного трафіку розглянуто в роботі [7], де запропоновано метод формування потоків із заданим параметром Херста для чисельних експериментів. У публікаціях [8], [9] розроблено моделі вузлів електронних комунікацій з урахуванням особливостей TCP- та змішаного TCP/UDP-трафіку, що дозволяє досліджувати взаємодію протоколів у режимах пікового навантаження. У роботі [10] показано можливість підвищення показників QoS шляхом оптимізації дисципліни обслуговування за умов перевантаження мережі.

Таким чином, наявні дослідження охоплюють окремі аспекти самоподібного трафіку, специфічні чергові моделі або певні типи навантаження. Водночас узагальнена аналітична модель системи чергування, яка одночасно враховує сумісний вплив пуасонівських, фрактальних і детермінованих потоків та дозволяє отримувати залежності показників QoS у такій змішаній постановці, у відомих роботах відсутня. Це визначає актуальність і наукову новизну запропонованого в статті підходу.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розроблення узагальненої математичної моделі системи чергування для телекомунікаційних систем з різнорідним трафіком, яка забезпечує коректне врахування пуасонівської, фрактально-корельованої та детермінованої складових вхідного

навантаження і дозволяє отримувати аналітичні оцінки показників якості обслуговування. Досягнення цієї мети передбачає визначення характеристик різноманітного трафіку, формування узагальненої структури моделі на основі розширеної інтерпретації схеми  $M/G/1$ , а також виведення залежностей, що описують середній час очікування, довжину черги та рівень завантаження мережевого вузла. У межах дослідження важливо також здійснити перевірку розробленої моделі шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі OMNeT++, порівняти отримані у симуляції результати з аналітичними оцінками та встановити параметричні умови, за яких модель забезпечує найкраще наближення до реальної поведінки змішаного трафіку. Таке поєднання аналітичного та експериментального підходів дозволяє комплексно оцінити працездатність моделі та підтвердити її практичну цінність для аналізу й оптимізації телекомунікаційних систем.

**Виклад основного матеріалу.** *Формалізація математичної моделі.* У телекомунікаційних системах сучасного покоління вхідний трафік формується сукупністю потоків різної природи, що у загальному випадку не може бути зведений до класичної пуасонівської моделі. Нехай у систему надходить компонент, який описується традиційним пуасонівським потоком із інтенсивністю  $\lambda_p$ , фрактально-корельована складова, змодельована через марковський модульований потік (ММРР), та детермінований періодичний компонент. Для початку позначимо інтенсивність пуасонівської складової як

$$\lambda_p \quad (1)$$

а фрактальну інтенсивність у стані  $i$  моделі ММРР як

$$\lambda_i, i = 1, \dots, m. \quad (2)$$

Перемикання між станами ММРР визначається матрицею інтенсивностей

$$Q = [q_{ij}], \quad (3)$$

а стаціонарний розподіл  $\pi$  цього марковського процесу задовольняє систему рівнянь

$$\pi Q = 0, \quad (4)$$

разом з умовою нормування

$$\sum_{i=1}^m \pi_i = 1. \quad (5)$$

Середня інтенсивність фрактального потоку, що враховує перебування в кожному стані з відповідною ймовірністю, визначається як

$$\lambda_F = \sum_{i=1}^m \pi_i \lambda_i. \quad (6)$$

Крім стохастичних потоків, система приймає детерміновану складову з періодом  $T_D$  і фіксованим розміром пакета  $b_D$ , що відповідає ефективній середній інтенсивності

$$\lambda_D = \frac{1}{T_D}. \quad (7)$$

Узагальнюючи, ефективна інтенсивність змішаного потоку становить

$$\lambda_{\text{tot}} = \lambda_p + \lambda_F + \lambda_D. \quad (8)$$

Для подальшого аналізу розглянемо систему як узагальнену чергу типу  $M/G/1$ , у якій час обслуговування описується довільним розподілом з моментами

$$\mathbb{E}[S] = \frac{1}{\mu}, \quad (9)$$

$$\mathbb{E}[S^2] = \sigma_s^2 + \mathbb{E}[S]^2. \quad (10)$$

У телекомунікаційних системах із фрактальною компонентою час обслуговування часто характеризується коефіцієнтом варіації

$$C_s^2 = \frac{\sigma_s^2}{\mathbb{E}[S]^2}, \quad (11)$$

звідки

$$\mathbb{E}[S^2] = \mathbb{E}[S]^2 (1 + C_s^2). \quad (12)$$

Ступінь завантаження системи визначається добутком загальної інтенсивності надходжень і середнього часу обслуговування:

$$\rho = \lambda_{\text{tot}} \mathbb{E}[S]. \quad (13)$$

Для стабільності черги повинна виконуватися умова

$$\rho < 1. \quad (14)$$

Середній час очікування в черзі визначається формулою Поллачека–Хінчина:

$$\mathbb{E}[W_q] = \frac{\lambda_{\text{tot}} \mathbb{E}[S^2]}{2(1-\rho)}. \quad (15)$$

Звідси середня довжина черги становить

$$\mathbb{E}[L_q] = \lambda_{\text{tot}} \mathbb{E}[W_q]. \quad (16)$$

Підставивши (15), одержуємо

$$\mathbb{E}[L_q] = \frac{\lambda_{\text{tot}}^2 \mathbb{E}[S^2]}{2(1-\rho)}. \quad (17)$$

Загальний середній час перебування пакета у системі визначається співвідношенням

$$\mathbb{E}[W] = \mathbb{E}[W_q] + \mathbb{E}[S]. \quad (18)$$

А відповідний середній розмір черги з урахуванням обслуговуваного пакета дорівнює

$$\mathbb{E}[L] = \lambda_{\text{tot}} \mathbb{E}[W]. \quad (19)$$

Щоб урахувати вплив фрактальної компоненти більш повно, варто врахувати кореляційні властивості вхідного потоку. Для ММРР інтегральна автокореляційна функція трафіку має вигляд

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \pi_i \lambda_i (e^{\rho \tau})_{ij} \lambda_j - \lambda_F^2, \quad (20)$$

що відображає часову залежність інтенсивності. Ця властивість призводить до того, що другий момент часу надходження фактично збільшується, що позначається на збільшенні  $\mathbb{E}[W_q]$  у (15).

Якщо детермінована складова домінує, система наближається до D/G/1. Для цього випадку доцільно використовувати модифіковану формулу очікування:

$$\mathbb{E}[W_q]_{\text{DGI}} = \frac{\lambda_{\text{tot}} \mathbb{E}[S^2]}{2(1-\rho)} - \frac{1}{2T_D}. \quad (21)$$

Для складних змішаних систем можна використовувати еквівалентну інтенсивність, вводячи параметр ефективної кореляції  $\kappa$ , що коригує другий момент:

$$\mathbb{E}[S^2]_{\text{eff}} = \mathbb{E}[S^2](1+\kappa). \quad (22)$$

Після цього середній час очікування набуває форми

$$\mathbb{E}[W_q]_{\text{eff}} = \frac{\lambda_{\text{tot}} \mathbb{E}[S^2](1+\kappa)}{2(1-\rho)}. \quad (23)$$

Таким чином, узагальнена модель дозволяє описати систему чергування, що приймає поєднання пуасонівського, детермінованого та фрактального трафіку. Формули (1)–(23) відображають повний математичний апарат переходу від вхідних інтенсивностей і кореляційних властивостей

потоку до основних показників QoS: часу очікування, середньої довжини черги, часу перебування пакета у системі та ступеня завантаження. Отримані залежності забезпечують можливість практичного прогнозування поведінки змішаних телекомунікаційних потоків та оцінювання ефективності роботи вузлів у реальних мережах.

*Експериментальне дослідження моделі в середовищі OMNET++.*

Для перевірки працездатності та адекватності узагальненої моделі системи чергування з різнорідним трафіком було проведено серію експериментів у середовищі OMNeT++. Метою моделювання було оцінити, наскільки поведінка реальної черги, отриманої шляхом симуляції, відповідає аналітичним залежностям, сформульованим у математичному розділі. Усі результати порівнюються з теоретичними виразами, зокрема з формулами (13), (15), (17) та (18), які визначають відповідно ступінь завантаження, середній час очікування у черзі, середню довжину черги та загальний час перебування пакета в системі (таблиця 1).

В основу моделювання було покладено одно-серверну систему обслуговування, що відповідає структурі (M/G/1). Єдиний вузол із заданою пропускною здатністю приймає сумарний трафік, який є суперпозицією трьох компонентів: пуасонівської, фрактальної (згенерованої як марковський модульований потік) та детермінованої періодичної послідовності. Середня інтенсивність кожної зі складових визначалася відповідно до теоретичних залежностей, що наведені у формулах (1)–(8). Зокрема, фрактальна складова формувалася на основі стаціонарного розподілу матриці інтенсивностей переходів (формули (4)–(6)), а детермінований потік – як послідовність із періодом, визначеним у (7). Сумарна інтенсивність системи для кожного сценарію обчислювалася відповідно до формули (8), а обчислення ступеня завантаження виконувалося через вираз (13), що дозволяло контролювати умову стабільності  $\rho < 1$ .

Таблиця 1

Параметри системи обслуговування

| Позначення       | Параметр                                | Значення  | Опис                                   |
|------------------|-----------------------------------------|-----------|----------------------------------------|
| $C$              | Пропускна здатність вузла               | 10 Мбіт/с | Швидкість обслуговування пакета        |
| $B$              | Середній розмір пакета                  | 800 байт  | Для обчислення часу обслуговування     |
| $\mathbb{E}[S]$  | Середній час обслуговування             | 0.64 мс   | Розраховано за (9)                     |
| $C_s^2$          | Коефіцієнт варіації часу обслуговування | 1.5       | Для моделювання нерівномірності        |
| $T_{\text{sim}}$ | Час симуляції                           | 100 с     | Стандартна тривалість збору статистики |

У ході експериментів OMNeT++ здійснював накопичення вибірових величин часу очікування та довжини черги, далі вони усереднювалися й порівнювалися з теоретичними очікуваннями. Залежність часу очікування у черзі розраховувалася відповідно до формули Поллачека–Хінчина (15), а середня довжина черги – через вираз (17). Для отримання загального часу перебування пакета в системі результати моделювання порівнювали з теоретичними значеннями відповідно до (18). Узгодженість цих величин давала змогу оцінити точність застосування узагальненої моделі до випадків змішаного трафіку.

Перший експериментальний сценарій був спрямований на дослідження того, як змінюється середня довжина черги за різних рівнів завантаження системи (рисунок 1). Для цього сумарну інтенсивність вхідного трафіку поступово змінювали таким чином, щоб охопити діапазон від низьких навантажень (приблизно 0,2) до режимів, близьких до насичення (понад 0,85). Отримані під час моделювання залежності порівнювалися з аналітичними результатами, які визначаються формулою (17). Аналіз показав, що за малих значень завантаження емпіричні дані практично збігаються з теоретичними оцінками, тоді як у діапазоні понад 0,7 спостерігається суттєвіше зростання довжини черги порівняно з аналітичною моделлю, що пояснюється впливом фрактальної компоненти трафіку.

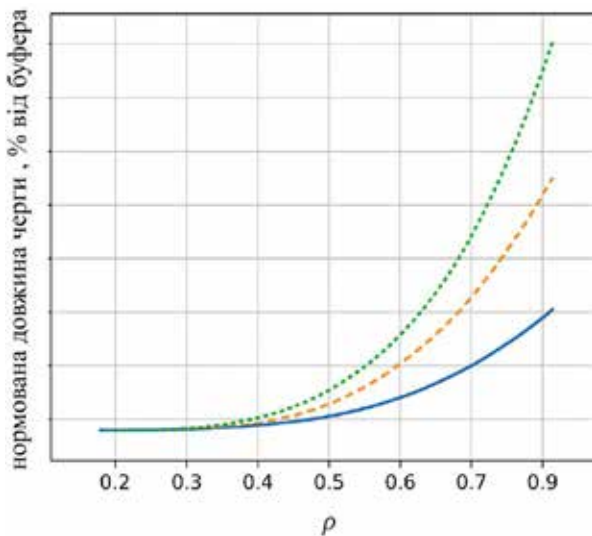


Рис. 1. Залежність середньої довжини черги  $\hat{L}_q$  від ступеня завантаження  $\rho$  для трьох типів змішаного трафіку (пуасонівського, змішаного та змішаного з фрактальною складовою)

Другий сценарій був присвячений оцінюванню того, як зміна частки фрактального трафіку в сумарному потоці впливає на часові характеристики системи за умови фіксованого рівня завантаження (рисунок 2). У цьому випадку співвідношення між інтенсивностями  $\lambda_p$ ,  $\lambda_F$  та  $\lambda_D$  варіювалося так, щоб загальна інтенсивність залишалася сталою, тоді як частка фрактальної компоненти поступово зростала від нуля до 0,8. Здобуті в ході моделювання залежності порівнювалися з аналітичними оцінками, визначеними формулою (15). Аналіз показав, що підвищення частки фрактально корельованого трафіку, навіть за незмінного середнього навантаження, призводить до істотного й нелінійного збільшення часу очікування. Така поведінка узгоджується з теоретичними положеннями, оскільки у формулі (15) визначальним чинником виступає другий момент часу обслуговування, який значно зростає для потоків із фрактальними властивостями.

Третій сценарій був зосереджений на оцінюванні точності узагальненої моделі за умови варіації ефективного коефіцієнта кореляції, який визначає внесок другого моменту часу обслуговування у формулі (15) (рисунок 3). Під час експерименту порівнювали емпіричні значення часу очікування з теоретичними оцінками, що відповідають різним припущенням щодо інтенсивності кореляцій у трафіку. Отримані залежності продемонстрували наявність діапазону значень кореляційного параметра, у межах якого аналітична модель най-

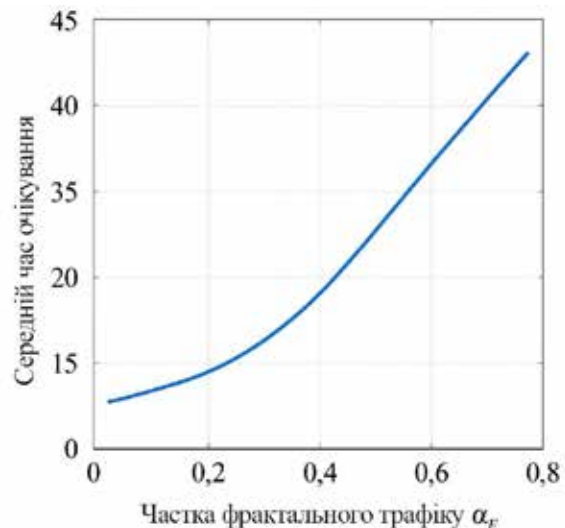


Рис. 2. Залежність середнього часу очікування  $W_q$  від частки фрактального трафіку  $\alpha_F$  при фіксованому завантаженні системи



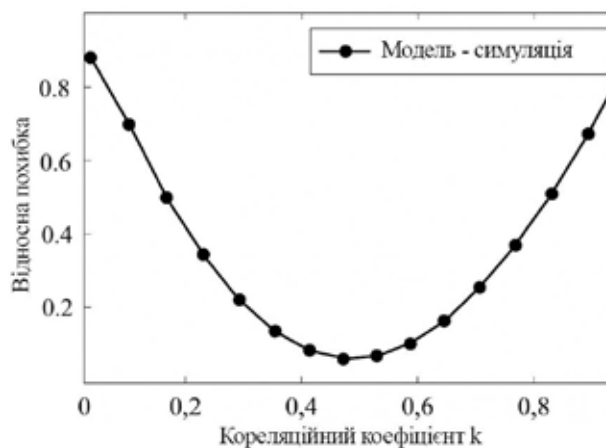


Рис. 3. Залежність відносної похибки моделі від кореляційного коефіцієнта  $k$

більш точно узгоджується з результатами симуляції (таблиця 2). Це підтверджує, що кореляційні властивості трафіку є критичним фактором для адекватної оцінки показників QoS і повинні враховуватися при побудові моделей змішаних телекомунікаційних потоків.

Проведений аналіз демонструє, що побудована узагальнена модель коректно описує динаміку системи у широкому діапазоні навантажень і співвідношень між окремими потоками. Результати OMNeT++ узгоджуються з теоретичними оцінками з високою точністю у зоні малих і середніх завантажень, а у зоні високих навантажень виявляється значний вплив фрактальної природи трафіку, що підтверджує актуальність

використання змішаних моделей та підхід, розроблений у статті.

**Висновки.** У роботі запропоновано узагальнену математичну модель системи чергування, що враховує комбінований вплив трьох типів мережевого трафіку: пуасонівського, фрактально-корельованого та детермінованого. Використання розширеної структури моделі типу  $M/G/1$  дало змогу отримати аналітичні залежності для визначення ключових показників якості обслуговування, включаючи середню довжину черги та час очікування. Результати моделювання в середовищі OMNeT++ показали високу відповідність між поведінкою реальної системи та теоретичними оцінками, особливо у діапазоні малих та середніх навантажень.

Доведено, що збільшення частки фрактального трафіку навіть за незмінного середнього значення інтенсивності призводить до суттєвого зростання часу очікування та нерівномірності обслуговування. Також виявлено, що точність моделі істотно залежить від кореляційних характеристик трафіку; існує діапазон значень узагальненого кореляційного параметра, у якому аналітична модель забезпечує мінімальну похибку щодо симуляційних даних.

Отримані результати підтверджують практичну придатність запропонованої моделі для аналізу, оптимізації та прогнозування продуктивності телекомунікаційних систем зі змішаним трафіком, а також її можливе застосування у проектуванні вузлів мереж нового покоління.

Таблиця 2

Параметри трафіку для трьох експериментальних сценаріїв

| Параметр                               | Сценарій 1<br>(зміна $\rho$ ) | Сценарій 2 (зміна<br>фрактальної частки) | Сценарій 3<br>(зміна кореляції) |
|----------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|
| $\lambda_p$                            | 200–900 пак/с                 | 400 пак/с                                | 400 пак/с                       |
| $\lambda_F$                            | 0–400 пак/с                   | 0–700 пак/с                              | 300 пак/с (сталій)              |
| $\lambda_D$                            | 50 пак/с                      | 50 пак/с                                 | 50 пак/с                        |
| $T_D$                                  | 20 мс                         | 20 мс                                    | 20 мс                           |
| $Q$                                    | $[[[-60, 60], [40, -40]]]$    | той самий                                | той самий                       |
| $\lambda_1, \lambda_2$                 | 50; 500                       | 50; 700                                  | 50; 700                         |
| Частка фрактального трафіку $\alpha_F$ | —                             | 0...0.8                                  | —                               |
| Кореляційний параметр $k$              | —                             | —                                        | 0...1                           |

## Список літератури:

1. Leland W.E., Taqqu M.S., Willinger W., Wilson D.V. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1994. Vol. 2, No. 1. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1109/90.282603>.
2. Paxson V., Floyd S. Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1995. Vol. 3, No. 3. P. 226–244. DOI: <https://doi.org/10.1109/90.392383>.
3. Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D. The speed calculating increasing method of the markov model network node. *Advanced Information Systems*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>.
4. Воронець О., Воронець В., Пустовойтов, П. Фрактальний підхід до прогнозування критичних станів вузлів мережі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2025. № 4(26). С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.04.03>.
5. Iftikhar M., Singh T., Landfeldt B., Caglar M. Multiclass G/M/1 queueing system with self-similar input and non-preemptive priority. *Computer Communications*. 2008. Vol. 31, No. 5. P. 1012–1027. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2007.12.033>.
6. D. Mallikarjuna Reddy, Rajaiah Dasari, Malla Reddy Perati, M. Krishna Reddy. Delay behaviour of internet router under self-similar traffic via rational approximations. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*. 2015. Vol. 14, no. 2. P. 134–144. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCND.2015.067654>.
7. Пустовойтов П. Є., Компанієць В. О. Метод формування самоподібного потоку із заданим параметром Херста для моделювання трафіку в мережі. *Технічна інженерія*. 2024. № 2(94). С. 185–190. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-185-190](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-185-190)
8. Воронець В.М., Пустовойтов П.Є. Модель вузла електронної комунікації, що обслуговує tcp-трафік. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Т. 4, № 74. С. 152–155. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.152>.
9. Pustovoitov, P., Voronets, V., Voronets, O., Sokol, H., Okhrymenko, M. Assessment of QoS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, no. 4 (127). P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>.
10. Воронець В.М., Пустовойтов П.Є. Метод формування плану передачі пакетів при піковому навантаженні мережі, який знижує відгук *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. Т. 1, № 75. С. 185–188. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.185>.

### Shyman M.V., Savchenko M.V. GENERALIZED QUEUEING MODEL FOR TELECOMMUNICATION SYSTEMS WITH DIVERSE TRAFFIC

*The paper considers the problem of mathematical modeling of queueing processes in modern telecommunication systems operating in conditions of heterogeneous and correlated traffic. It is shown that real network loads are formed by a combination of interactive services, streaming multimedia transmission, periodic control signals and fractal-correlated flows typical for cloud and IoT-oriented applications. Such a multi-component structure leads to significant fluctuations in the intensity of packet arrival, bursty traffic behavior and uneven loading of network nodes, which significantly complicates the assessment of service quality indicators. The limitations of classical queueing models such as M/M/1, M/G/1, D/G/1 and Markov modulated flows, which are based on Poisson or weakly correlated assumptions and are unable to fully reflect the influence of long-term dependence and fractal properties of traffic on system dynamics, are analyzed. It is substantiated that the use of such models in highly loaded telecommunication networks leads to inaccurate estimates of the average waiting time, queue length and delay probability, which, in turn, can cause degradation of the performance of network elements and violation of QoS requirements.*

*A generalized mathematical model of the queueing system is proposed, which takes into account a combination of flows of different nature – Poisson, fractal and deterministic, and is built on an extended interpretation of the classical M/G/1 scheme. Within the framework of a single formalism, analytical expressions for the average queue length, waiting time and resource utilization factor are derived, which allows for a comprehensive assessment of the quality of service in systems with mixed traffic, typical of modern telecommunication nodes. The reliability and practical applicability of the proposed approach are confirmed by the results of computer modeling in the OMNeT++ environment. The results obtained can be used for QoS analysis, bandwidth planning and optimization of network node operation in real operating conditions.*

**Keywords:** heterogeneous traffic, mathematical model, queues, QoS, Markov modular flow, telecommunication system, cloud traffic, data transmission, IoT, network nodes.

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 536.24:533.6.011

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/21>

**Баранюк О.В.**

<https://orcid.org/0000-0001-6008-6465>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Рачинський А.Ю.**

<https://orcid.org/0009-0006-2120-5541>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сидоренко Ю.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-1953-0410>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пікенін О.О.**

<https://orcid.org/0000-0003-2602-4708>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЕПЛОВІ Й ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ КОТЛА Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50)

В умовах інтеграції України до енергетичного простору ЄС та впровадження жорстких екологічних стандартів (Директива 2010/75/ЄС), актуальним завданням є модернізація застарілого парку парових котлів, зокрема типу Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50). Ключовим аспектом такої модернізації є прогнозування емісії забруднюючих речовин при переході котельних агрегатів на маневрені режими роботи. У роботі використано методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) для аналізу процесів стабілізованого горіння метану без попереднього змішування. Моделювання реалізовано в програмному комплексі ANSYS. Математична модель базується на осереднених за Рейнольдсом рівняннях Нав'є-Стокса, доповнених Realizable  $k$ - $\epsilon$  моделлю турбулентності. Апроксимацію розрахункової області виконано з використанням гібридної скінченно-елементної сітки з високою щільністю в зонах активного горіння. Розрахунок термічних і швидких  $\text{NO}_x$  проведено з урахуванням турбулентно-хімічної взаємодії компонентів та моделі часткової рівноваги для радикала О. Проведено чисельне дослідження роботи паливної котла ГМ-50 в діапазоні навантажень від 100% до 40% від номінального. Верифікація моделі за даними натурних експериментів ПАТ «Київенерго» підтвердила високу точність розрахунків: максимальне відхилення температури в зоні активного горіння не перевищує 3–10%. Встановлено характер розподілу теплових потоків на екранованих стінах паливної, де найбільше напруження локалізовано в області дії смолоскипів (до 50% висоти паливної). Визначено, що при номінальному навантаженні середня концентрація  $\text{NO}_x$  становить 359 ppт, що перевищує допустимі технологічні нормативи. Встановлено, що зниження навантаження призводить до перерозподілу зон генерації оксидів азоту, проте їх концентрація залишається високою через тривале перебування молекул у зонах високих температур. Результати дослідження обґрунтовують необхідність заміни штатних пальників



ГМГ-5 на сучасні низькоемісійні аналоги (зокрема струменево-нішеві). Отримані значення параметрів теплоносія в екранних трубах використані як граничні умови для подальшого моделювання гідродинаміки в барабані котла.

**Ключові слова:** CFD-моделювання, котел ГМ-50, паливня, оксиди азоту, ANSYS, тепловий стан, спалювання метану, екологічні нормативи.

**Постановка проблеми.** Питання спалювання органічного палива та оцінка його екологічного впливу залишаються пріоритетними напрямками розвитку сучасної енергетики. Забезпечення повноти згоряння за одночасного скорочення токсичних викидів є критично важливим для дотримання норм екологічної безпеки. Попри тенденцію до скорочення споживання природного газу в країнах ЄС, у багатьох азійських регіонах цей енергоресурс залишається базовим завдяки технологічній простоті та меншому екологічному навантаженню порівняно з вугіллям. У даному дослідженні за допомогою методів CFD-моделювання проаналізовано процес стабілізованого горіння без попереднього змішування в паливнику з низьким завихренням при варіюванні навантаження котла від 100% до 40%.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фундаментальну основу промислового енергетичного сектору становлять теплові електростанції, що функціонують у межах об'єднаних енергосистем. Більшість об'єктів генерації оснащено потужними паровими котлами, що використовують органічне паливо. Враховуючи значний ступінь вичерпання розрахункового ресурсу парку котлоагрегатів, зокрема типу Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50), актуальним постає питання обґрунтованого подовження терміну їх експлуатації. Пріоритетним шляхом вирішення цієї проблеми є технічне переоснащення із впровадженням сучасного паливовикористовуючого обладнання. Особливу увагу в цьому контексті приділено вітчизняним технологіям, які характеризуються високим рівнем адаптованості до наявної матеріальної бази та конкурентоспроможною ціною політикою порівняно з імпортними аналогами.

В умовах євроінтеграційних процесів України посилено вимоги до екологічних параметрів об'єктів спалювання вихідного палива [1]. Відповідно до Директиви 2010/75/ЄС [3] та вітчизняних нормативних актів (зокрема Наказу Мінприроди № 541 [2]), перед енергетичними підприємствами поставлено завдання щодо глибокої модернізації виробництв. Метою таких заходів є досягнення мінімальних значень викидів забруднюючих речовин та перехід до екологічно безпечних джерел енергії. Реалізація цих завдань потребує комплекс-

ного підходу, що поєднує інноваційні технічні рішення, стратегічне планування та тісну співпрацю між галузевими структурами й державними органами влади.

Вагомий внесок у розв'язання зазначених проблем зроблено фахівцями Інституту газу НАН України. Зокрема, було розроблено серію котлів із двосвітними екранами (ТВГ, КВГ) потужністю 4...10 МВт, а також подові щільні паливники третього покоління. Зазначене обладнання забезпечує рівні викидів оксидів азоту, що відповідають чинним екологічним директивам ЄС для котлів середньої потужності [4, 5].

Аналіз світового наукового досвіду свідчить про домінування методів комп'ютерного моделювання (зокрема ANSYS CFD) у дослідженнях, проведених після 2000 року [6]. Застосування таких інструментів дозволяє виконувати високоточне моделювання складних гідродинамічних і тепломасообмінних процесів. Сучасні тенденції розвитку чисельних методів спрямовані на пряме моделювання гідродинаміки з урахуванням детальної кінетики реакцій горіння [7, 8]. Водночас зазначається, що при розрахунках у масштабах, які значно перевищують товщину зони горіння (наприклад, для великогабаритних топків [9, 10]), точність результатів може знижуватися. Невирішеною залишається проблема ідентифікації набору елементарних стадій радикально-ланцюгового механізму термоокислення горючих газів, який би максимально адекватно відтворював реальні умови в паливних промислових котлах.

**Постановка завдання.** Метою статті є визначення впливу величини теплового навантаження котла Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50) на рівень води в його барабан-сепараторі, а також прогнозування утворення  $\text{NO}_x$  в димових газах на виході паливні при різних навантаженнях шляхом CFD-моделювання процесів горіння.

Метод дослідження – моделювання основних характеристик процесів горіння під час спалювання метану в комп'ютерній моделі паливні котла ГМ-50 внаслідок стабілізованого горіння метану в штатних паливниках ГМГ-5. Комп'ютерне моделювання виконувалося в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, що є абсолютно безкоштовним (з 2015 року) і призначеним для вирі-

шення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об'єктом дослідження є процеси, що відбуваються під час горіння газоподібного палива, та їх вплив на продуктивність парового котла ГМ-50.

Предметом дослідження є CFD-модель паливного котла ГМ-50, стандартні пальники якого здатні працювати як на рідкому, так і на газоподібному паливі.

**Виклад основного матеріалу.** Котли типу ГМ-50 (газозапатні, продуктивністю 50 тон пари на годину (рис. 1а)) та їхні модифікації (наприклад, водогрійні КВ-ГМ-50) були широко розповсюджені в радянській енергетиці. Вони розроблялися переважно для промислових котелень, великих заводів та ТЕЦ невеликої потужності. В Україні котли ГМ-50 та КВ-ГМ-50 встановлювалися на великих промислових майданчиках та об'єктах комунальної енергетики. Наприклад, в Київській області такі котли встановлювалися на великих цукрових заводів, та хімічних підприємствах де потрібна велика кількість технологічної пари.

Більшість районних котелень у великих містах (Київ, Харків, Дніпро, Одеса) використовують водогрійні аналоги – КВ-ГМ-50. Вони слугують для забезпечення централізованого опалення великих житлових масивів. В Черкасах, Полтаві та Вінниці такі котли слугують на місцевих ТЕЦ

промислового типу, які забезпечували парою прилегли заводи.

В Східній Європі котли цієї серії постачалися до країн соцтабору колишнього СРСР, де будувалися промислові гіганти за радянськими проектами, а саме для Болгарії (для ТЕЦ великих металургійних та нафтопереробних комбінатів (наприклад, у районі Бургаса)), для Польщі та Румунії (встановлювалися на підприємствах важкого машинобудування та хімічної промисловості, побудованих у 1970–80-х роках) та в країнах Балтії (Литва, Латвія, Естонія). Там ці котли використовувалися у великих районних котельнях Вільнюса та Риги [11].

У представленій роботі для апроксимації розрахункової області, що вибрана як паливний котла (рис. 1б) використана гібридна скінчено-елементна сітка. Такого типу сітка використовується, щоб заощадити ресурси комп'ютера при розрахунках. Відстань між сусідніми вузлами сітки регулювалась параметром *Relevance Center* зі значенням «Fine», що визначає найвищу щільність сітки. Розмір елементів сітки задавався в полі «Element Size» параметром *Relevance Center*.

На фронтальних стінах моделі паливни розміщено вихрові пальники, через яких газоподібне паливо подається в паливню. Для моделювання використані кресленики штатних газозапатних пальників потужністю 5.5 МВт (ГМГ-5). На

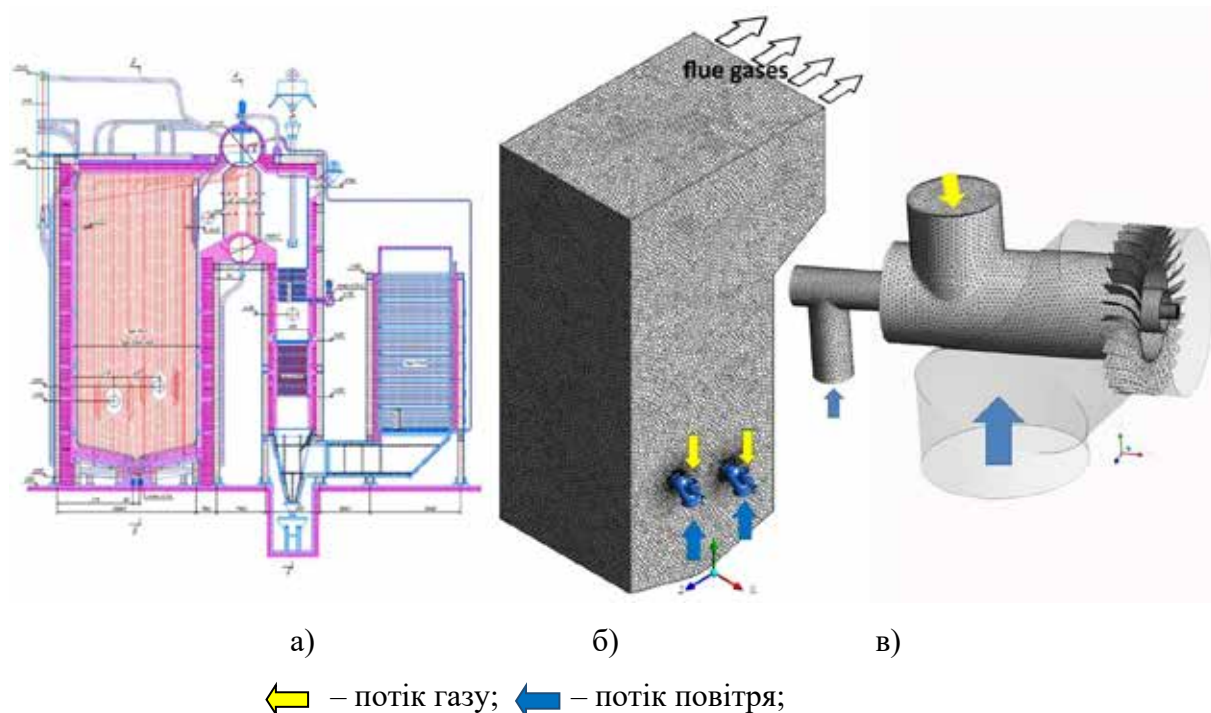


Рис. 1. Поздовжній переріз котла ГМ-50 (а), зображення скінчено-елементної сітки (б) та поздовжній переріз пальника ГМГ-5.5, що використаний в моделі (в)

рис. 1в приведено тривимірну модель та загальний вигляд газомазутного пальника ГМГ-5.5 [11]. В результаті налагоджувальних експериментів було визначено значення щільності розрахункової сітки, яке не впливає на рішення.

Комп'ютерна модель спалювання газоподібного палива в середовищі програмного комплексу ANSYS містить рівняння нерозривності, осереднені по Рейнольдсу рівняння збереження енергії, імпульсу і маси (Нав'є-Стокса), а також рівняння переносу  $i$ -го компонента суміші. Для замикання осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса використовувалась Realizable  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності. В якості керуючих рівнянь використовується система рівнянь нерозривності, Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями, рівняння енергії і збереження компонентів суміші [12].

З метою спрощення математичної моделі і постановки граничних умов, в якості «палива» при розробці CFD-моделі автори використали метан, оскільки природний газ, що використовувався в моделюванні за методиками, складається майже на 99% з  $\text{CH}_4$  та до 1%  $\text{N}_2$ . Теплотворна здатність  $\text{CH}_4$  становить 35,9 МДж/м<sup>3</sup>, а природного газу (що використовується наразі в Україні для виробників теплоти), становить 35,59 МДж/м<sup>3</sup>. Різниця в теплотворній здатності метану та природного газу становить менше 1%, що дозволяє вважати ці види палива подібними. Коефіцієнт надлишку повітря для горіння палива в обох типах моделювання був однаковим і становив  $\alpha = 1,05$ . Різниця в об'ємі продуктів згорання для природного газу становить 9,44 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, для  $\text{CH}_4$  9,41 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, різниця становить 0,3%. Приведені розрахунки свідчать про правомірність такого спрощення.

Засобами ANSYS-CFX розраховуються рівні термічних і швидких  $\text{NO}_x$ . Модель враховує турбулентно-хімічну взаємодію компонентів і дозволяє обчислювати рівні  $\text{NO}_x$  з урахуванням впливу турбулентних пульсацій при осередненій за часом швидкості реакції. Для прогнозування концентрації радикала  $\text{O}$ , необхідного для прогнозування температурних  $\text{NO}_x$  використовується модель часткової рівноваги.

В якості граничних умов стінці котельного агрегату задавався нерівномірний розподіл температури, що змінювався по лінійному закону – від температури теплоносія в нижньому роздатковому колекторі, до температури, яку має теплоносії перед входом в барабан котла. На виході із паливни враховувалось, що всі потоки, які потра-

пили в паливню крізь пальники полишають її крізь «вікно» фестону (рис. 1б).

Витрата газу через пальник  $V_g$  автори визначали за формулою, м<sup>3</sup>/с:

$$V_g = \frac{Q_n}{Q_n^p \cdot N \cdot \eta}, \quad (1)$$

де  $Q_n$  – номінальна теплова потужність пальника, кВт;  $Q_n^p$  – нижча теплота згорання газу, кДж/м<sup>3</sup>;  $N$  – кількість однотипних пальників, що приймаються до встановлення з однаковою витратою газу (в представлений роботі використано 4-ри пальники розташованих на фронтальних стінах котла);  $\eta$  – ККД пальника.

Необхідна витрата повітря через пальник розраховувалась за формулою, м<sup>3</sup>/с:

$$V_n = \alpha \cdot V_g \cdot V_n^0, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря, що подається в топкову камеру. При горінні газового палива прийнятий рівним 1,05;  $V_n^0$  – витрата повітря, необхідна для горіння 1 м<sup>3</sup> газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_n^0 = 0,0476 \left[ 0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 1,5\text{H}_2\text{S} + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - \text{O}_2 \right], \quad (3)$$

В роботі, навантаження котельного агрегату становило 100, 80, 60 і 40 відсотків від номінального навантаження. Для забезпечення такого навантаження, змінювались витрати газу і повітря, розраховані згідно формул (1 – 3).

#### Обговорення отриманих результатів.

Відомо, що результати комп'ютерного моделювання необхідно верифікувати з експериментальними або надійними теоретичними даними. Для верифікації результатів моделювання вибрані дані експериментального дослідження, що отримані службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [13]. Це розподіл температур і емісія окислів азоту в паливні котла.

На рис. 2 зображено температурне поле центрального поздовжнього перерізу паливни в залежності від навантаження котельного агрегату. На рис. 3 показано зміну температури димових газів в зоні активного горіння та в зонах горіння основного палива в залежності від висоти паливни.

Як свідчить рис. 3, температура димових газів в активній зоні горіння та на виході з топки збігається з максимальним відхиленням до 3 % з експериментальними даними [13]. Температури в нижній частині паливни збігаються з експериментальними даними, при цьому відхилення становить менше одного відсотка. Найбільше відхилення розрахункових значень температур від



експериментальних спостерігається на висоті 5 – 8 м, у зоні допалювання. Проте, це відхилення не перевищує 10 %, що є цілком припустимим при використанні достатньо обмеженої, але безкоштовної версії ANSYS-CFX. Також необхідно відмітити, що виходячи з експериментальних точок (рис. 3) температурне поле в середині паливні повинно бути достатньо рівномірним, проте і в даній роботі, і в роботі [13] спостерігається більш інтенсивне охолодження димових газів в зоні допалювання.

Після успішної верифікації моделі (рис. 3), CFD-моделювання дозволяє отримати дані, які складно отримати за допомогою експериментальних методів. А саме, розподіл теплових потоків на стінках паливні (рис. 4).

Приведений на рис. 4 розподіл теплових потоків на стінках котельного агрегату свідчить, що найбільше теплове напруження спостерігається в області активного горіння поблизу розташування пальників. Ця область займає приблизно 50 % від висоти котельного агрегату, починаючи свій відлік від поду паливні. Очевидно, зі зменшенням теплового навантаження на котельний агрегат, теплове напруження на стінки паливні зменшується.

Розподіл концентрації оксидів азоту  $\text{NO}_x$  приведений на рис. 5 який свідчить, що максимальна концентрація забруднюючих речовин спостерігається в зонах з високих температур. Це не суперечить існуючим уявленням про генерацію в паливні котла оксидів азоту. Максимум інтенсивності генерації окислів азоту зміщується в кінець

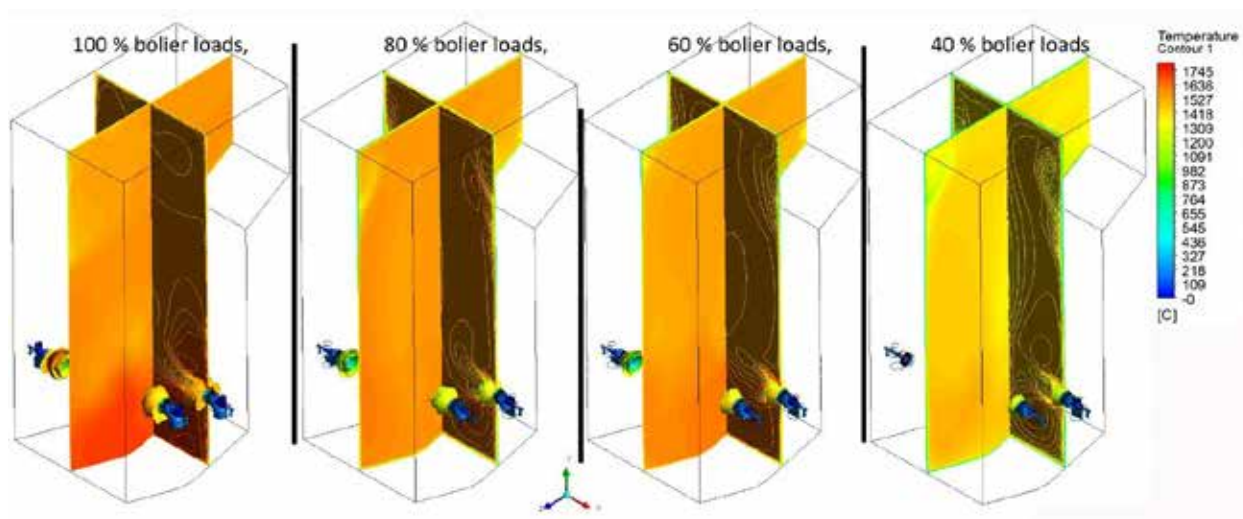


Рис. 2. Температурне поле паливні в залежності від навантаження котельного агрегату

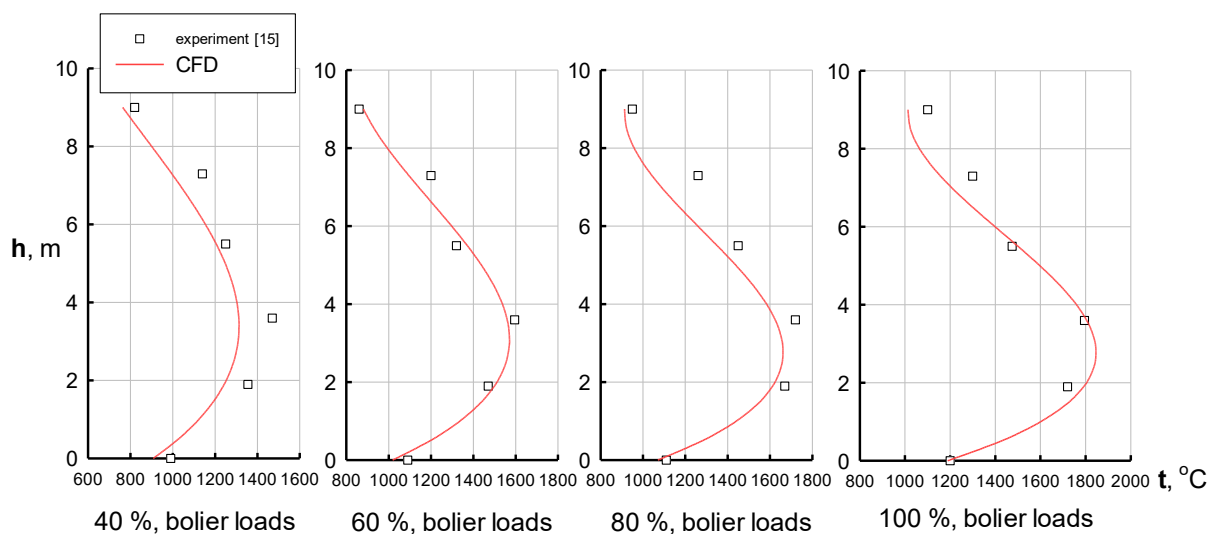


Рис. 3. Зміна температури продуктів згоряння по центральній осі по висоті паливні котла



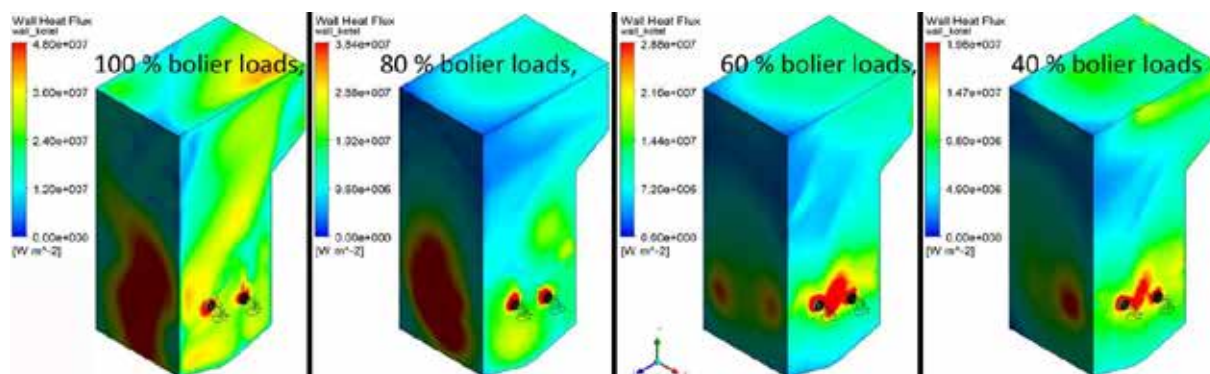


Рис. 4. Розподіл теплових потоків на фронтальній і бічних стінках котельного агрегату при зміні навантаження

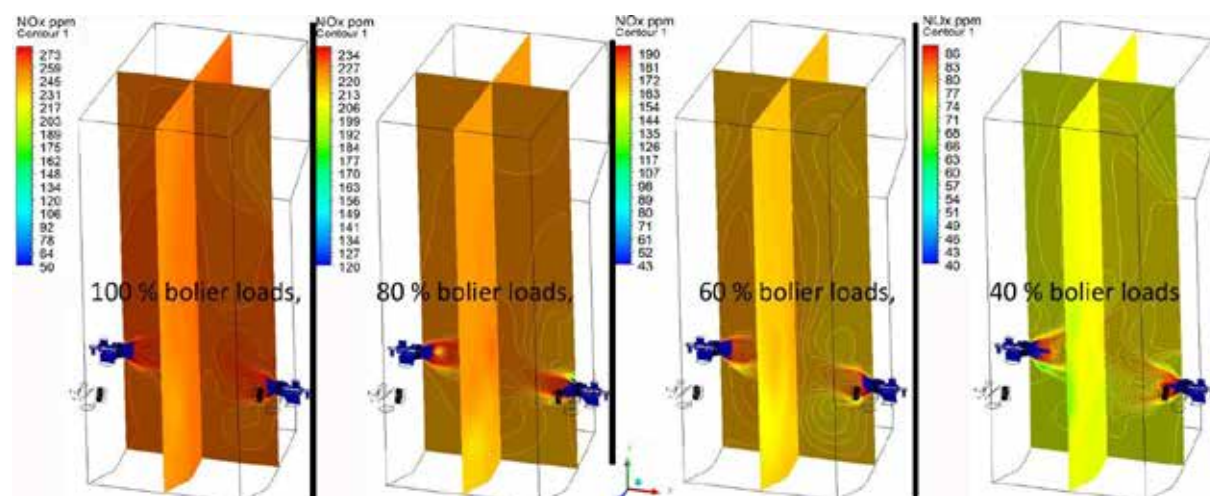


Рис. 5. Розподіл  $\text{NO}_x$  в перерізах паливни

факелу. Це можна пояснити тим, що молекули повітря значно довше знаходяться в зоні високих температур.

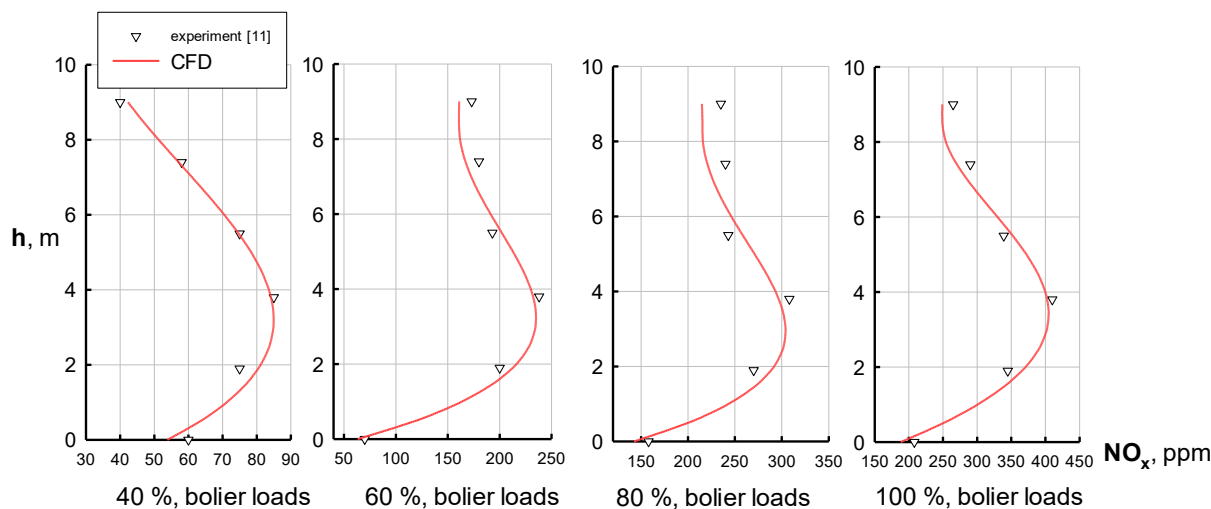
Аналіз даних рис. 5 дозволяє зробити висновок, що створені в зоні дії високих температур окисли азоту не руйнуються і з паливни потрапляють в конвективну шахту котельного агрегату. Якщо не застосовувати міри по очистці (наприклад, відновлення, та адсорбції, що заснована на адсорбції оксидів азоту різними адсорбентами (цеоліт, торф, кокс та ін.)) можуть потрапити в атмосферу.

Для того щоб зробити висновок про доцільність подальшої заміни штатних пальників на більш сучасні, в роботі визначено середні значення оксидів азоту на виході з паливни (рис. 6) становить 359 ppm.

Ці значення достатньо узгоджуються з результатами експериментального дослідження, отриманими службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [13]. Експеримент [13] свідчить, що середнє значення оксидів азоту на виході

з паливни котла ГМ-50 повинно становити 280 ppm при номінальному навантаженні. Зазначені відхилення між даними CFD-моделювання і експериментом ПАТ «Київенерго» можуть бути наслідком відмінності в задаваних граничних умовах і реальними умовами на стінці під час експлуатації котла.

Розподіл концентрації оксидів азоту  $\text{NO}_x$ , приведений на рис. 5 і 6, свідчить, що максимальна концентрація забруднюючих речовин спостерігається в зонах з високих температур. Це не суперечить існуючим уявленням про генерацію в паливни котла оксидів азоту. Аналіз даних рис. 6 дозволяє зробити висновок, що створені в зоні дії високих температур оксиди азоту не руйнуються в своїй більшості і з паливни потрапляють в конвективну шахту котельного агрегату. Якщо не застосовувати заходи по очистці димових газів (наприклад відновлення  $\text{NO}_x$  до молекулярного азоту  $\text{N}_2$ ) буде відбуватись перевищення допустимих питомих викидів  $\text{NO}_x$  до атмосфери [14].

Рис. 6. Зміна значень  $\text{NO}_x$  продуктів згорання по центральній осі по висоті паливни котла

В майбутньому, для зменшення рівня генерації  $\text{NO}_x$  у такому типі котла автори вважають доцільним замінити штатні пальники на пальники, що побудовані на основі струменево-нішевої технології як найбільш перспективні через низький рівень викидів оксидів азоту [15].

**Висновки.** Проведено верифікацію CFD-моделі, результати якої за температурними показниками та емісією  $\text{NO}_x$  узгоджуються з експериментальними даними, отриманими службою

енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [9] і розрахунків моделі не перевищує 10 %.

Різниця між розрахунковим та аналітичним об'ємним паровмістом у межах 9–18% зумовлена прийнятими спрощеннями та обмеженнями програмного середовища.

Встановлено, що штатні пальники котла ГМ-50 признано такими, що не відповідають нормам щодо викидів оксидів азоту та пропонуються їх заміна на струменево-нішеві.

#### Список літератури:

1. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: Закон України № 1678-VII від 16.09.2014. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text) (дата звернення: 10.05.2024).
2. Про затвердження технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із тепло-силових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт : Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 22.10.2008 р. № 541. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08> (дата звернення: 10.05.2024).
3. Directive 2010/75/EU of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control): Official Journal of the European Union. 2010. 17 December. 119 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075> (дата звернення: 10.05.2024).
4. Лавренцов Є.М., Сігал І.Я., Сміхула А.В., Домбровська Е.П., Кернажицька О.С., Марасін А.В. Досвід розробки, впровадження та модернізації водогрійних котлоагрегатів з двосвітними екранами та щільними подовими пальниками. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 3. С. 17–26. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.02>
5. Directive (EU) 2015/2193 of the European parliament and of the council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants : Official Journal of the European Union. 2015. 28 November. 19 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L2193> (дата звернення: 10.05.2024).
6. ANSYS. Найкращі інструменти для інженерних розрахунків. URL: <https://www.ansys.soften.com.ua> (дата звернення: 10.05.2024).
7. Aspden A. J., Day M. S., Bell J. B. Three-dimensional direct numerical simulation of turbulent lean premixed methane combustion with detailed kinetics. *Combust. Flame* 2016. (166). 266–283.
8. Wang H., Hawkes E. R., Savard B., Chen J. H. Direct numerical simulation of a high Ka  $\text{CH}_4$ /air stratified premixed jet flame. *Combust. Flame* 2018. (193). 229–245.

9. Chen W., Liu G. Numerical Investigation on the Flow, Combustion and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics in a 10 MW Premixed Gas Burner. *The Open Fuels & Energy Science Journal*. 2015. (8). 1–13.
10. Trisjono P., Kleinheinz K., Kang S., Pitsch H. Large eddy simulation of stratified and sheared flames of a premixed turbulent stratified flame burner using a flamelet model with heat loss. *Flow Turbulence Combust.* 2014. (92). 201–235.
11. Boilers of Small and Average Power, Catalog of M.: Research Institute of Informenergomash, 1987, p. 208p.
12. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, (2012) ANSYS Inc. ANSYS Help, URL: <https://ansyshelp.ansys.com> (дата звернення: 10.05.2024).
13. Lohvyniuk M., Novakivskyi Ye. CFD modeling of thermal processes in the firebox and heat load distribution on the screen surface firebox / *Heliyon*, 10(5), e27324, 2024. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27324>
14. Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапоніч Л.С., Чернявський М.В., Топал О.І., Засядько Я.І. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України : К. : ГНОЗІС, 2013. 308 с.
15. Сірий О.А., Абдулін М.З., Баранюк О.В. Дослідження гідродинаміки потоку повітря в струменевій системі спалювання палива. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. № 9(1181). С. 94–100. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.09.14>

**Baranyuk O.V., Rachynskyi A.Yu., Sydorenko Iu.V., Pikenin O.O. CFD MODELING OF THE IMPACT OF CHANGES IN THERMAL LOAD ON THE THERMAL AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF THE N-50-3.9-440GM (GM-50) BOILER**

*In the context of Ukraine's integration into the EU energy space and the introduction of strict environmental standards (Directive 2010/75/EU), the current task is to modernize the outdated fleet of steam boilers, in particular of the N-50-3.9-440GM (GM-50) type. A key aspect of such modernization is the prediction of pollutant emissions when boiler units switch to maneuverable operating modes. The work uses computational fluid dynamics (CFD) methods to analyze the processes of stabilized methane combustion without prior mixing. The modeling was implemented in the ANSYS software package. The mathematical model is based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, supplemented by the Realizable  $k$ - $\epsilon$  turbulence model. The approximation of the computational domain was performed using a hybrid finite element mesh with high density in active combustion zones. The calculation of thermal and fast NO<sub>x</sub> was carried out taking into account the turbulent-chemical interaction of components and the partial equilibrium model for the O radical. A numerical study of the operation of the GM-50 fuel boiler in the load range from 100% to 40% of the nominal one was carried out. Verification of the model according to the data of full-scale experiments of PJSC «Kyivenergo» confirmed the high accuracy of the calculations: the maximum temperature deviation in the active combustion zone does not exceed 3–10%. The nature of the distribution of heat flows on the shielded walls of the fuel tank was established, where the greatest stress is localized in the area of the torches (up to 50% of the fuel tank height). It was determined that at the nominal load the average concentration of NO<sub>x</sub> is 359 ppm, which exceeds the permissible technological standards. It was established that a decrease in the load leads to a redistribution of the zones of generation of nitrogen oxides, but their concentration remains high due to the prolonged stay of molecules in high-temperature zones. The results of the study justify the need to replace standard HMG-5 burners with modern low-emission analogues (in particular, jet-niche ones). The obtained values of the coolant parameters in the screen tubes were used as boundary conditions for further modeling of hydrodynamics in the boiler drum.*

**Keywords:** CFD modeling, GM-50 boiler, fuel plant, nitrogen oxides, ANSYS, thermal state, methane combustion, environmental standards.

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Бошкова І.Л.**

<https://orcid.org/0009-0009-5599-2709>

Одеський національний технологічний університет

**Волгушева Н.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>

Одеський національний технологічний університет

**Мукмінов І.І.**

<https://orcid.org/0000-0002-3674-9289>

Одеський національний технологічний університет

**Писаревський І.О.**

<https://orcid.org/0009-0007-3920-9601>

Одеський національний технологічний університет

**Гречановський А.П.**

<https://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

Одеський національний технологічний університет

## ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОТИ НИЗЬКОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ДЛЯ ТЕПЛИЦЬ

Розглядається питання підвищення ефективності акумуляції тепла низького температурного потенціалу з метою підтримки мікроклімату теплиці. Наголошується, що вирішення цієї проблеми потребує оптимізації акумулювальних матеріалів, конструктивного розміщення акумуляторів та систем керування тепловими потоками, що створює основу для розробки енергоефективних та стійких тепличних комплексів. Аналізується використання теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях як перспективний напрямок підвищення енергоефективності та зниження залежності від традиційних джерел тепла. Підкреслюється, що використання фазоперехідних матеріалів забезпечують більш рівномірну віддачу теплоти в заданому температурному діапазоні, проте їх практичне застосування ускладнюється високою вартістю, обмеженою довговічністю і складністю підбору оптимальної температури фазового переходу для конкретних кліматичних умов. На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що проблема застосування теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях носить комплексний характер і пов'язана з фізичними обмеженнями сонячного ресурсу, властивостями матеріалів, що акумулюють, конструктивними та економічними факторами. Вирішення цієї проблеми вимагає оптимізації параметрів теплових акумуляторів, вибору ефективних матеріалів, що акумулюють, і розробки адаптивних систем управління тепловим режимом теплиць. Наведені схемні рішення систем акумулювання теплової енергії для теплиць. Розробка схем здійснювалась для теплових акумуляторів явного та прихованого типу, де основним елементом теплового акумулятора явного типу був теплообмінний канал, заповнений щільним шаром гранульованого матеріалу. Запропонований ґрунтовий кожухотрубний регенератор з фазоперехідним матеріалом, який передбачає акумулювання надлишкової теплоти повітря у внутрішньому об'ємі теплиці з можливістю її використання при зниженні температури повітря у нічні часи. Наголошується, що остаточний вибір системи накопичення теплоти залежить від вартості матеріалу та виготовлення, простоти конструкції та можливості інтеграції в об'єм теплиці.

**Ключові слова:** сонячна енергія, акумулятори теплової енергії, фазоперехідні матеріали, гранульовані матеріали, схемні рішення.

**Постановка проблеми.** Енергоефективність тепличних господарств залишається одним із ключових завдань сучасного агропромислового комплексу [1]. Значна частина споживаної енергії витрачається на підтримку оптимального мікроклімату для вирощування рослин, особливо в холодні та перехідні періоди року [2]. При цьому сонячна енергія є найбільш доступним та екологічно чистим джерелом тепла, проте її використання обмежене через нерегулярне надходження та низький температурний потенціал. Низькотемпературні теплові потоки, характерні для сонячного випромінювання та накопиченої у тепличних конструкціях енергії, важко використовувати безпосередньо для обігріву без ефективних систем акумулювання. Існуючі методи накопичення тепла часто характеризуються обмеженою ємністю, значними тепловими втратами та великогабаритністю акумулювальних пристроїв, що знижує їхню практичну ефективність в умовах обмеженого простору теплиці. Внаслідок цього виникає актуальна науково-технічна проблема: підвищення ефективності акумуляції тепла низького температурного потенціалу з метою стабільної підтримки мікроклімату теплиці за мінімального споживання традиційних енергоносіїв. Вирішення цієї проблеми потребує оптимізації акумулювальних матеріалів, конструктивного розміщення акумуляторів та систем керування тепловими потоками, що створює основу для розробки енергоефективних та стійких тепличних комплексів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні роки виник підвищений інтерес до пошуку шляхів утилізації низькопотенційної теплової енергії [3]. Одним із найбільш перспективних напрямків є застосування теплових акумуляторів сонячної енергії, що дозволяють згладити нерівномірність теплонадходжень та забезпечити більш стабільний тепловий режим у теплицях. [4]. Аналіз літературних джерел показує, що найпоширенішим підходом є інтеграція сонячних теплових систем з акумулювальними пристроями короткострокової та сезонної дії [5 – 7]. Використання теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях розглядається як перспективний напрямок підвищення енергоефективності та зниження залежності від традиційних джерел тепла [8, 9]. Проте практичне впровадження таких систем супроводжується низкою технічних, економічних та експлуатаційних проблем.

У ряді робіт розглядаються системи, в яких надмірна сонячна теплота, що отримується в ден-

ний час, акумулюється і використовується в нічний час, що дозволяє суттєво знизити споживання традиційних енергоносіїв [10, 11]. Істотна увага у дослідженнях приділяється вибору акумулювальних матеріалів [12]. Традиційні акумулювальні матеріали (вода, камінь, бетон) мають обмежену питому теплоємність, що збільшує габарити акумуляторів [14, 15]. У сучасних дослідженнях активно вивчаються матеріали з фазовим переходом, які мають високу щільність теплової енергії, що акумулюється, і дозволяють зменшити габарити акумуляторів [16 – 18]. Підкреслюється, що такі матеріали забезпечують більш рівномірну віддачу теплоти в заданому температурному діапазоні, проте їх практичне застосування ускладнюється високою вартістю, обмеженою довговічністю і складністю підбору оптимальної температури фазового переходу для конкретних кліматичних умов [19], а також загальний енергетичний ефект системи знижують недостатня теплопровідність акумуляторів. Особлива увага приділяється питанням конструктивної інтеграції теплових акумуляторів до тепличних споруд [21 – 23]. Зазначається, що нераціональне розміщення пристроїв, що акумулюють, може призводити до погіршення світлового режиму і зниження корисної площі вирощування рослин [24]. Технологія накопичення теплової енергії у поєднанні з матеріалами з фазовим переходом – ефективне рішення, що дозволяє накопичувати енергію у процесі виробництва сонячної енергії та вивільняти її за необхідності [25]. Такий підхід має незаперечну перевагу у вирішенні проблеми періодичності сонячної енергії.

Основною проблемою використання теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях є нерівномірність надходження сонячної енергії протягом доби та сезону [26, 27]. Технологія накопичення енергії може зменшувати піки та заповнювати спади, оптимізуючи моделі споживання енергії та підвищуючи енергоефективність. У огляді [28] систематично розглянуті новітні дослідження в технології накопичення тепла з фазовим переходом та приділено особливу увагу активним методам з використанням зовнішніх польових збурень та гібридним підходам для покращення теплопередачі з ФПМ.

Таким чином, проблема застосування теплових акумуляторів сонячної енергії в теплицях носить комплексний характер і пов'язана з фізичними обмеженнями сонячного ресурсу, властивостями матеріалів, що акумулюють, конструктивними та економічними факторами. Вирішення цієї про-



блеми вимагає оптимізації параметрів теплових акумуляторів, вибору ефективних матеріалів, що акумулюють, і розробки адаптивних систем управління тепловим режимом теплиць.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка схемних рішень акумуляторів явної теплоти на основі щільних шарів гранульованих матеріалів та прихованої теплоти на основі фазоперехідних матеріалів рідина – тверде тіло, інтегрованих у тепличне господарство.

**Виклад основного матеріалу. Схемні рішення систем акумулювання теплової енергії для теплиць.** Встановлено, що розміщення теплових акумуляторів у теплицях обмежено доступним обсягом та вимогами до освітленості рослин. Великогабаритні акумулятори можуть знижувати корисну площу вирощування та погіршувати світловий режим, що негативно впливає на врожайність. Висока початкова вартість теплових акумуляторів, особливо під час використання сучасних матеріалів, збільшує термін окупності системи. Для малих та середніх тепличних господарств це часто є визначальним фактором відмови від впровадження сонячних теплових акумуляторів. Внаслідок цього постало завдання розробки ефективних схемних рішень для теплових акумуляторів, інтегрованих у тепличне господарство. Дослідження проводилися для двох типів теплових акумуляторів: явного та прихованого типу. Основним елементом теплового акумулятора явного типу був теплообмінний канал, заповнений щільним шаром гранульованого матеріалу, наприклад, щебенем. При інтенсивному сонячному випромінюванні теплота поглиналася водою, що проходить під дахом теплиці, яка потім подавалася на вхід теплообмінного каналу. При теплообміні між потоком води та поверхнею частинок відбувається акумуляція теплоти шаром твердих частинок. Вертикальне розташування каналу дозволило вирішити проблему гідравлічного опору шару і дає можливість вибору насоса малої потужності, необхідної для прокачування води каналами замкнутого контуру. Схема установки представлена на рис. 1.

На виході з теплообмінного каналу встановлений насос, який подає охолоджену воду до каналів під дах теплиці, де вона знову нагрівається. Умови розташування теплообмінного каналу із щебенем за межами теплиці є кращими, оскільки корисна площа теплиці не зменшується. Раніше авторами пропонувалося встановлювати в теплиці ґрунтовий регенератор [29], недоліком якого виявилася складність продування щільного шару щебеню

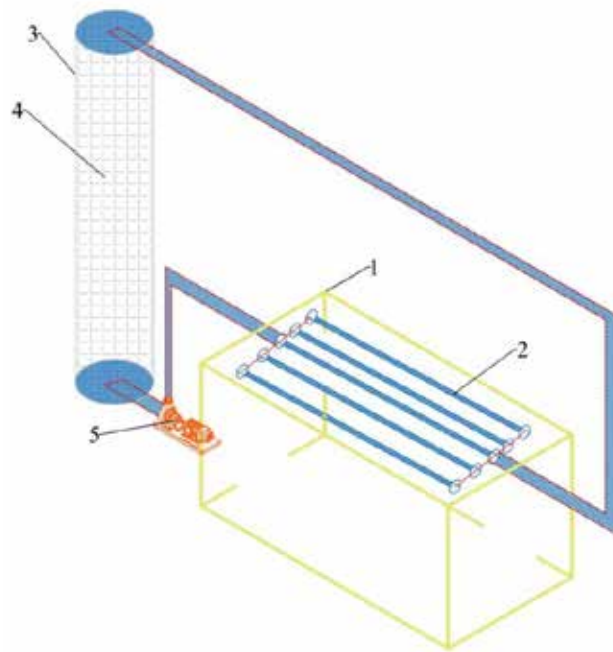


**Рис. 1. Система акумуляції низькопотенційної теплоти сонячного випромінювання явного типу**

1 – корпус теплиці; 2 – циркуляційний нагрівальний контур з водою; 3 – теплообмінний канал; 4 – щільний шар щебеню; 5 – рідинний насос.

повітрям. Для усунення цього недоліку та використання переваг використання фазоперехідних матеріалів пропонується встановити ґрунтовий регенератор

Алгоритм функціонування ґрунтового регенератора полягає в наступному. При досягненні температури повітря в теплиці 30-35 °С на день з інтенсивним сонячним випромінюванням включається каналний вентилятор, розташований у вихідному повітропроводі, після чого тепле повітря по повітропроводу надходить у теплообмінний канал, в якому здійснюється теплообмін між потоком повітря і пучком труб із фазоперехідним матеріалом. Волога, що конденсується в нічний час на пучку труб, стікає через перфорований сегмент теплообмінного каналу дренажний канал трикутного перерізу. На виході з каналу конденсат через трубку, з'єднану зі збіркою конденсату, при включенні насоса сконденсована вода відкачується в ємність. При досягненні температури в теплиці заданого рівня сигнали з датчиків температури надходять в систему автоматики, яка керує заслінкою, та вони закриваються після закінчення періоду нагрівання фазоперехідного матеріалу. При зниженні температури повітря в теплиці нижче допустимого рівня, включається вентилятор в теплиці і повітря, проходячи через трубний

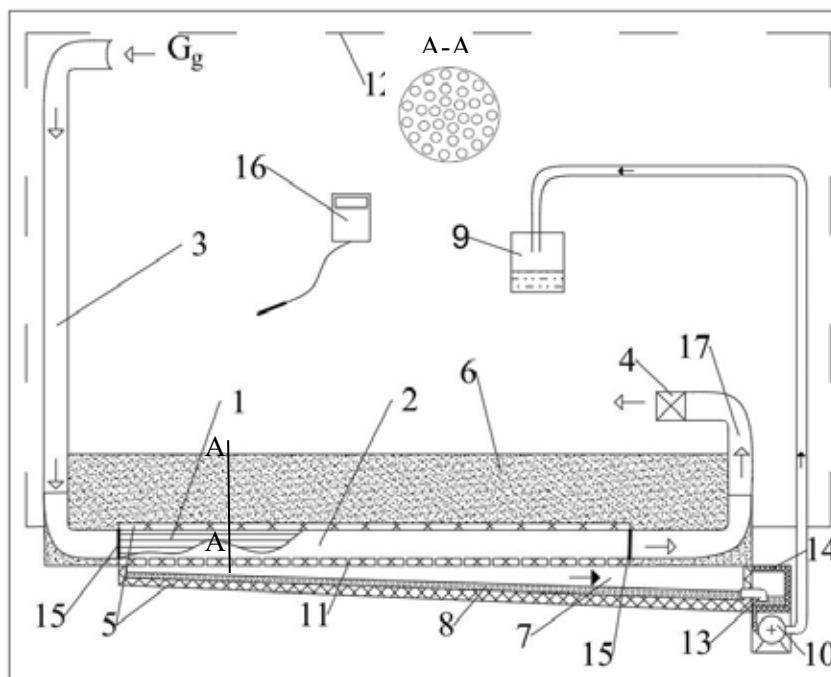


**Рис 2. Схема установки грунтового регенератора кожухотрубного типу з фазоперехідним матеріалом у теплиці**

1 – пучок труб з фазоперехідним матеріалом, 2 – теплообмінний канал, 3 – повітропровід, 4 – каналний вентилятор, 5 – теплоізоляція, 6 – ґрунт теплиці, 7 – дренажний канал, 8 – конденсат, 9 – ємність для збору конденсату, 10 – насос, 11 – теплиця, 13 – дренажна трубка, 14 – збірка конденсату, 15 – теплоізольовані заслінки, 16 – датчики температури, 17 – вихідний повітропровід

пучок, нагрівається від теплоти фазового переходу та надходить у внутрішній простір теплиці і температура підвищується. Встановлені теплоаккумуляційні канали в трубному пучку пропонується заповнювати модифікованим парафіном або іншою речовиною, температура фазового переходу якого корелюється з допустимою температурою повітря в теплиці.

**Висновки.** Установка теплообмінних каналів із щебенем має перевагу для існуючих теплиць, оскільки не потребує глобальної перебудови теплиці. Для теплиць, що знову будуються, раціонально передбачити встановлення регенеративного теплообмінника-утилізатора з фазоперехідним матеріалом, що вимагає додаткової конструкторської розробки.

Незважаючи на прогрес у теорії та випробуванні пілотних установок, залишаються питання, які ще не отримали універсального вирішення:

оптимізація зарядки та віддачі тепла: важливо забезпечити ефективний теплопередавальний інтерфейс між акумулятором та внутрішнім простором теплиці, а також адаптивне керування режимами для різних кліматичних умов; економічна привабливість: вартість матеріалів та установки залишається високою для широкого комерційного розповсюдження, особливо у невеликих господарствах. Ці питання потребують уважного розгляду у подальших дослідженнях.

**Acknowledgments.** Дослідження виконано завдяки фінансуванню Національного фонду досліджень України у рамках проекту «Вирішення фундаментальних проблем створення нового покоління термоаккумуляційних наноматеріалів для накопичення теплоти сонячної енергії та теплових відходів (теплофізичні властивості, теплообмін)» реєстраційний номер 2025.07/0417.

#### Список літератури:

1. Savytskyi M., Danishevskyy V., Bordun M. Accumulation of solar energy to heat greenhouses. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2020. Vol.985. P.012013. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012013>
2. Castro R. P., Dinho da Silva P., Pires L. C. C. Advances in Solutions to Improve the Energy Performance of Agricultural Greenhouses: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 14. P. 6158. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14146158>



3. Low-grade thermal energy utilization: Technologies and applications / D. Ji et al. *Applied Thermal Engineering*. 2024. P. 122618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122618>
4. Jobir Axadov, Sevinch Muzafarova, Jurabek Kamolov. Use of heat accumulators in greenhouse type passive solar heating systems. *International Journal of Science and Research Archive*. 2025. Vol. 14, no. 3. P. 1174–1178. DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.3.0787>
5. Ding D. Integration of Active Solar Thermal Technologies in Greenhouses: A Mini Review. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.757553>
6. Savytskyi M., Danishevskyy V., Bordun M. Accumulation of solar energy to heat greenhouses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. P. 012013. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012013>
7. The Advancements in Agricultural Greenhouse Technologies: An Energy Management Perspective / S. Nagarsheth et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 8. P. 3407. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083407>
8. Thermal Performance of a Solar Heat Storage Accumulator Used For Greenhouses Conditioning / M. Hazami et al. *American Journal of Environmental Sciences*. 2005. Vol. 1, no. 4. P. 270–277. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajessp.2005.270.277>
9. Assessment of the greenhouse climate with a new packed-bed solar air heater at night, in Tunisia/S. Bouadila et al. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2014. Vol. 35. P. 31–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.051>
10. Thermal Performance of a Solar Heat Storage Accumulator Used For Greenhouses Conditioning / M. Hazami et al. *American Journal of Environmental Sciences*. 2005. Vol. 1, no. 4. P. 270–277. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajessp.2005.270.277>
11. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications / H. M. Ali et al. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2024. Vol. 100. P. 101109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101109>
12. A critical review on thermal energy storage materials and systems for solar applications / D. M. Reddy Prasad et al. *AIMS Energy*. 2019. Vol. 7, no. 4. P. 507–526. DOI: <https://doi.org/10.3934/energy.2019.4.507>
13. Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse / A. Bazgaou et al. *Solar energy*. 2020. Vol. 198. P. 8–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.041>
14. Katekar V. P., Rao A. B., Sardeshpande V. R. An experimental investigation to optimise pebbles-based sensible heat storage system: An exploration to improve thermal efficiency of solar devices. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 73. P. 108964. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108964>
15. Effect of sensible heat storage materials on the thermal performance of solar air heaters: State-of-the-art review / P. R. Olivkar et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 157. P. 112085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112085>
16. Venkateswarlu K., Ramakrishna K. Recent advances in phase change materials for thermal energy storage-a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 44, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03308-7>
17. Rathore P. K. S., Sikarwar B. S. Thermal energy storage using phase change material for solar thermal technologies: A sustainable and efficient approach. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2024. Vol. 277. P. 113134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113134>
18. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications / K. Faraj et al. *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 33. P. 101913. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101913>
19. Calborean A., Máthé L., Bruj O. Phase Change Materials for Thermal Management in Lithium-Ion Battery Packs: A Review. *Batteries*. 2025. Vol. 11, no. 12. P. 432. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries11120432>
20. Nanofluids in Thermal Energy Storage Systems: A Comprehensive Review / M. S. Peer et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 3. P. 707. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18030707>
21. Barriers and Opportunities Regarding the Implementation of Rooftop Eco.Greenhouses (RTEG) in Mediterranean Cities of Europe / I. Cerón-Palma et al. *Journal of Urban Technology*. 2012. Vol. 19, no. 4. P. 87–103. DOI: <https://doi.org/10.1080/10630732.2012.717685>
22. Ding D. Integration of Active Solar Thermal Technologies in Greenhouses: A Mini Review. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.757553>
23. Castro R. P., Dinho da Silva P., Pires L. C. C. Advances in Solutions to Improve the Energy Performance of Agricultural Greenhouses: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 14. P. 6158. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14146158>
24. Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity / M. Cossu et al. *Applied Energy*. 2014. Vol. 133. P. 89–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.070>

25. Osibodu S. J., Adeyinka A. M., Mbelu O. V. Phase change material integration in concrete for thermal energy storage: techniques and applications in sustainable building. *Sustainable Energy Research*. 2024. Vol. 11, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00138-8>
26. Mao Q., Wang Y. Recent development of thermal heat storage technology coupling with phase change material. *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 139. P. 118739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118739>
27. Experimental Evaluation of Thermal Energy Storage (TES) with Phase Change Materials (PCM) for Ceiling Tile Applications / M. Velasco-Carrasco et al. *Future Cities and Environment*. 2020. Vol. 6, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.5334/fce.101>
28. Phase change thermal energy storage: Materials and heat transfer enhancement methods / X. Zhai et al. *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 123. P. 116778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116778>
29. Mukminov, I., Volgusheva, N., Georgiesh, C., & Boshkova, I. Experimental study of a pilot unit of a ground regenerator for greenhouses. *ScienceRise*, 2022, vol. 2, pp. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002411>

### **Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Mukminov I.I., Pysarevskiy I.I., Hrechanovskiy A.P. PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF LOW-TEMPERATURE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR GREENHOUSES**

*The paper addresses the issue of improving the efficiency of low-temperature thermal energy accumulation in order to maintain the greenhouse microclimate. It is emphasized that solving this problem requires optimization of heat storage materials, structural placement of thermal accumulators, and thermal flow control systems, which forms the basis for the development of energy-efficient and sustainable greenhouse complexes. The use of solar thermal energy storage systems in greenhouses is analyzed as a promising approach to increasing energy efficiency and reducing dependence on conventional heat sources. It is noted that the use of phase change materials ensures a more uniform heat release within a specified temperature range; however, their practical application is constrained by high cost, limited durability, and the complexity of selecting an optimal phase transition temperature for specific climatic conditions. Based on an analysis of the literature, it has been established that the application of solar thermal energy storage systems in greenhouses is a complex problem associated with physical limitations of the solar resource, properties of storage materials, as well as structural and economic factors. Addressing this issue requires optimization of thermal accumulator parameters, selection of efficient storage materials, and development of adaptive control systems for greenhouse thermal regimes. Schematic solutions of thermal energy storage systems for greenhouses are presented. The system designs were developed for both sensible and latent heat storage systems, where the main element of the sensible heat storage unit is a heat exchange channel filled with a dense layer of granular material. A soil-based shell-and-tube regenerator with a phase change material is proposed, which enables the accumulation of excess heat from the air inside the greenhouse with the possibility of its utilization during nighttime temperature drops. It is emphasized that the final selection of a thermal energy storage system depends on material and manufacturing costs, simplicity of design, and the feasibility of integration into the greenhouse volume.*

**Keywords:** solar energy, thermal energy storage, phase change materials, granular materials, schematic solutions.

Дата першого надходження статті до видання: 30.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Брунеткін О.І.**

<https://orcid.org/0000-0002-6701-8737>

Національний університет «Одеська політехніка»

**Музика Д.О.**

<https://orcid.org/0009-0002-4081-2209>

Національний університет «Одеська політехніка»

**Тафій В.В.**

<https://orcid.org/0009-0004-6556-8964>

Національний університет «Одеська політехніка»

## ІМІТАЦІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗИФІКАЦІЇ ОРГАНІЧНОЇ СИРОВИНИ

*Розглядаються питання організації процесу повільного піролізу органічних речовин в загальному випадку невідомого і змінного складу. Актуальність роботи визначається розглядом можливості використання різних органічних відходів (побутових, сільськогосподарських, промислових) без їх попереднього сортування і сушіння для отримання вторинних енергетичних ресурсів відомого (контрольованого) складу. Новизна роботи обумовлена розробкою моделі методу контрольованого піролізу або газифікації органічних речовин з мінімальною кількістю твердих залишків при максимальній теплотворній здатності одержуваної суміші горючих газів.*

*Розроблено імітаційну математичну модель установки термодеструкції органічних речовин, яка базується на її конструктивному та технологічному описі і дозволяє досліджувати динамічні властивості процесу. Основні канали регулювання моделі можна розглядати як інерційну ланку першого порядку з транспортним запізнюванням. Параметри цієї ланки, такі як сталий час і величина запізнення, залежать від геометричних розмірів установки і потребують індивідуальної настройки для кожного конкретного об'єкта.*

*Встановлено, що на етапі моделювання існують режими роботи, за яких система може переходити зі стійкого стану в нестійкий унаслідок наявності позитивного зворотного зв'язку. Цей ефект визначається співвідношенням між витратами вихідної сировини та витратою рециркуляційного газу. Водночас наявність регуляторів дозволяє стабілізувати технологічний процес піролізу на заданих значеннях основних параметрів.*

*Показано, що для моделювання автоматичної системи керування достатньо застосовувати одноконтурні регулятори. Вимкнення будь-якого з регуляторів призводить до погіршення якості регулювання, проте система загалом зберігає стабільність функціонування, що свідчить про її робастність і резерви регульовальної стійкості.*

*Запропоновано схему моніторингу складу сировини в режимі реального часу в процесі піролізу (газифікації). Знання складу дозволяє контролювати процес його переробки з метою: а) організації оптимального процесу газифікації з метою максимізації кількості та енергетичної цінності суміші газоподібних продуктів реакції; б) контролю витрати перероблюваної сировини для отримання необхідної кількості газоподібного продукту в будь-який заданий момент часу.*

**Ключові слова:** термохімічна конверсія, органічна речовина, керований піроліз, імітаційна математична модель, комбінований газогенератор

**Вступ.** Одним із важливих аспектів сучасних екологічних проблем є утилізація побутових, сільськогосподарських та інших органічних відходів. Зі зростанням їхніх обсягів можливості полігонів

для складування стрімко вичерпуються, що спричинило кризову ситуацію. Згідно з ухваленою «дорожньою картою», до 2035 року державам ЄС дозволятиметься захоронювати на полігонах

не більше 10% комунальних відходів. Для досягнення цього показника активно впроваджують системи сортування сміття, які дозволяють значну його частину спрямовувати на ресайклінг та компостування. Однак, навіть за умови таких заходів, майже половину відходів нині, як і в перспективі, доводиться спалювати – або безпосередньо, або з отриманням енергії.

Термічне знищення відходів сьогодні залишається одним із найбільш забруднювальних методів їх перероблення, проте наразі йому практично немає альтернативи. Однією з ключових причин високої забрудненості викидів сміттєспалювальних заводів є нестабільний та непередбачуваний склад відходів, що надходять на спалювання. Через це неможливо забезпечити точне й кероване подавання повітря, необхідне для оптимізації процесу горіння та зменшення шкідливих викидів.

Раніше був запропонований метод визначення змінного і невідомого складу горючих газів в режимі реального часу в процесі їх спалювання [1]. Цей метод дозволяє організувати оптимально керований процес спалювання таких газів з мінімальним забрудненням навколишнього середовища. Одним із шляхів зменшення забруднення навколишнього середовища при спалюванні твердих органічних відходів може служити попередня їх газифікація з подальшим використанням методу, викладеного в [1]. Таким чином, актуальною є організація процесу повної газифікації органічних речовин із збереженням максимально можливої теплотворної здатності утвореної суміші газів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із факторів забруднення навколишнього середовища при розміщенні органічних відходів на полігонах (звалищах) є виділення метану. За твердженням Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату ООН (IPCC) [2], парникова активність метану в розрахунку на 100 років у 28 разів сильніша, ніж у вуглекислого газу того ж обсягу, що утворюється при спалюванні метану. У 20-річній перспективі ця величина ще більша – у 84 рази.

Об'єднуючою особливістю більшості робіт, пов'язаних з газифікацією органічної сировини, є розгляд в якості вихідних різних, але обов'язково відомих вихідних речовин. На противагу цьому в реальній ситуації практично важливим є випадок непередбачуваної зміни в процесі переробки складу сировини.

Основним способом отримання енергії з органічної сировини традиційно залишається її спа-

лювання, хоча в технологічному ланцюзі можуть застосовуватися й інші процеси – газифікація та піроліз. Продукти цих проміжних стадій у підсумку також підлягають спаленню. Історично дослідження у сфері спалювання, газифікації та піролізу розвивалися незалежно одне від одного, у різні періоди та різними науковими школами. Вони спиралися на різні типи вихідних матеріалів і переслідували різні цілі. Так, у процесах спалювання увага зосереджувалася на досягненні максимального тепловиділення шляхом мінімізації недопалу й уникнення надлишку повітря. На відміну від цього, газифікація спрямована на зниження енергетичних втрат і отримання газової суміші з максимально можливою теплотворною здатністю. Піроліз же потребує підведення тепла й приводить до утворення твердого вуглецевого залишку, конденсованих і неконденсованих газоподібних продуктів. Таким чином, кожен із цих напрямів використовує власні підходи та моделі.

У оглядовому дослідженні [3] відображено внесок європейських та американських наукових груп у розвиток зазначених технологій. Водночас автори цієї роботи пропонують розглядати всі процеси у межах єдиної класифікації «термохімічної обробки біомаси», що створює певну методологічну суперечність щодо різної природи цих процесів та їхніх цілей. Проблематика пошуку альтернативних джерел енергії та шляхів утилізації відходів залишається актуальною в усьому світі [4].

У низці робіт наголошується на можливості плавного переходу одного процесу в інший або їх комбінованого протікання в межах одного обладнання. Наприклад, у роботі [5] газифікацію розглядають як окремий випадок спалювання, що передбачає можливість використання єдиної моделі для опису різних варіантів термічної переробки біомаси за умови зміни коефіцієнта надлишку окиснювача. Це обумовлює необхідність вивчення проміжних та комбінованих режимів [6]. В іншому дослідженні [7] аналізується варіант протікання піролізу в присутності невеликої кількості повітря, так званий «квазіпіроліз». Подібні умови можуть виникати на одному й тому самому обладнанні при використанні однакового вихідного матеріалу, що створює складності у застосуванні моделей, призначених окремо для піролізу чи газифікації. Проблема особливо загострюється за неконтрольованих змін складу сировини чи випадкових підсмоктувань повітря.

Додаткову складність становить велика кількість чинників, що впливають на перебіг піролізу.

У наукових публікаціях їх зазвичай розглядають окремо або в обмежених комбінаціях [8–9], що пояснюється різноманітністю вихідних матеріалів, конфігурацій реакторів та режимних параметрів процесу. Це підкреслює багатовимірність проблематики та необхідність комплексних підходів для її подальшого вивчення.

Проблеми, що виникають, можуть бути вирішені при використанні пристрою, що дозволяє одночасно реалізовувати як процеси піролізу, так і газифікації. Таким чином, актуальною є розробка моделі такого пристрою та його управління.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка схеми та моделі процесу газифікації органічної сировини при забезпеченні максимально можливої теплотворної здатності суміші газів, що утворюється.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- визначити можливу схему установки;
- розробити єдину модель для вирішення завдань спалювання, газифікації та повільного піролізу при змінному і невідомому складі вихідних вуглеводневих речовин.

**Виклад основного матеріалу. Схема установки і модель процесу спалювання, газифікації та повільного піролізу вуглеводневих речовин невідомого і змінного складу**

*Схема установки.* Принципова схема (рис. 1) побудована на основі установки, описаної в [10].

На рис. 1 наведено принципову схему газогенератора (ГГ), запропонованого для подальшого аналізу. Корпус установки виконано у вигляді єдиної конструкції, що складається з трьох функціонально взаємопов'язаних частин. У частині 1а розміщено зону горіння та газифікації, у частині 1b – зону піролізу деревних відходів, а частина 1с призначена для газифікації органічної сировини довільного складу.

Незважаючи на конструктивну ідентичність зон 1b і 1с, режими та параметри процесів, що в них реалізуються, істотно відрізняються. У зоні 1b формуються умови для піролізу деревини за відсутності або мінімальної подачі повітря, основною метою якого є отримання максимально можливої кількості деревного вугілля. Утворене вугілля подається до зони 1а та використовується як основний робочий продукт для процесів горіння і газифікації.

У зоні 1с, навпаки, створюються умови для максимально повної газифікації органічної сировини з утворенням мінімально можливого об'єму карбонізованих залишків. Шлакові відходи, що

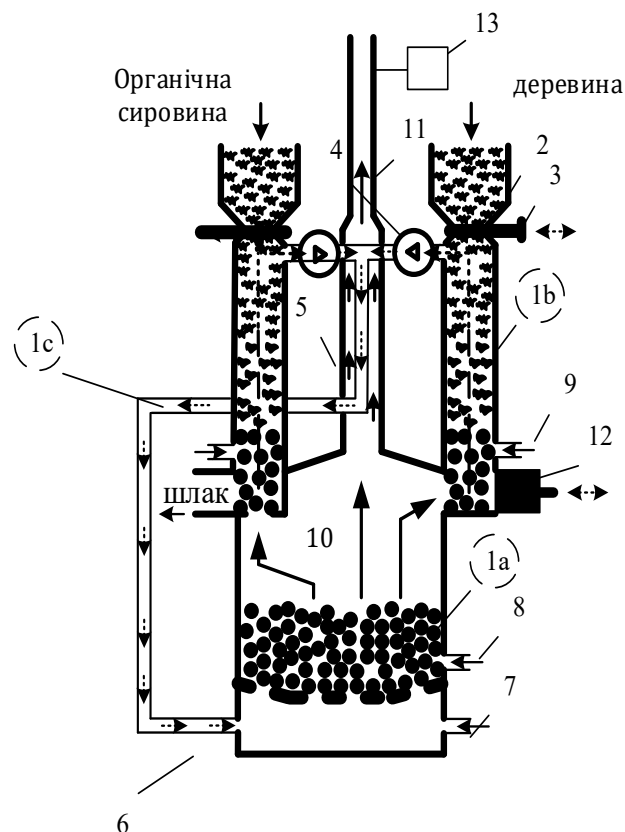


Рис. 1. Принципова схема

формуються в цій зоні, видаляються з установки з подальшим захороненням на полігонах або використанням у виробництві будівельних матеріалів. За фізико-хімічною природою процеси, що відбуваються в зонах 1b і 1с, є подібними, тому взаємодію елементів установки доцільно розглядати на прикладі зон 1а та 1b.

Вихідна сировина надходить у зону піролізу з бункера 2 через клапан 3 з витратою  $G_{\square}$ . Газоподібні продукти піролізу за допомогою вентилятора (димососа) 4 через теплообмінник 5 подаються в нижню частину 6 зони горіння і газифікації. Подача окислювача може здійснюватися в різні ділянки 7 і 8 зони горіння та газифікації, а також у ділянку 9 нижньої частини зони піролізу, що є можливими, але не обов'язковими точками введення.

У результаті протікання реакцій на виході з реактора через колектор 11 утворюється гарячий продукт-газ із витратою  $Q_2$ , який надходить до загальної газорозподільної системи.

У межах цієї системи продукт-газ розподіляється на два потоки: основний потік з витратою  $Q_4$  спрямовується до споживача, тоді як другий потік з витратою  $Q_3$  по лінії рециркуляції повертається в реактор. процесу.

Частина утворених газів із верхньої частини 10 зони газифікації спрямовується в зону піролізу, забезпечуючи теплову та газову взаємодію між зонами. Інша частина газів надходить у теплообмінник 5, після чого через вихід 11 подається до споживача.

Принцип роботи установки розглянемо на прикладі використання деревних відходів як вихідної сировини. Після виходу газогенератора на заданий режим у зоні горіння і газифікації 1а підтримується висока температура шару деревного вугілля, необхідна для стабільного протікання процесів. Підтримання температурного режиму може здійснюватися кількома способами: шляхом безпосереднього продовження горіння деревного вугілля при подачі окислювача через ділянку 8; шляхом часткового окислення (спалювання) частини піролізних газів, що надходять у нижню частину 6, при подачі окислювача через ділянку 7 з подальшим проходженням продуктів горіння крізь шар деревного вугілля; а також шляхом комбінованого використання зазначених способів.

У міру карбонізації деревних відходів утворене деревне вугілля з нижнього сегмента зони піролізу 1b за допомогою пристрою 12 подається до зони 1а, де воно залучається до процесів горіння і газифікації. Одночасно з бункера 2 через клапан 3 здійснюється безперервне або періодичне поповнення піролізної частини 1b газогенератора новою порцією вихідної сировини.

У процесі експлуатації газогенератора керування режимами роботи може здійснюватися за рахунок зміни продуктивності димососа 4, що впливає на інтенсивність відведення та рециркуляції газів; варіювання місць подачі окислювача (7, 8 або 9), їх комбінації та об'ємів поданого окислювача; а також регулювання об'єму і швидкості подачі деревного вугілля з нижнього сегмента зони 1b у зону 1а і швидкості подачі вихідної сировини з бункера 2.

*Синтез системи керування установкою.* Для керування та оптимізації роботи піролізної установки розроблено імітаційну математичну модель, яка описує її динамічні властивості за допомогою багатоканальної структури. Модель відображає взаємозв'язки між основними вхідними та вихідними параметрами процесу піролізу–газифікації і дає змогу аналізувати вплив керуючих дій на режим роботи установки.

Перший канал моделі встановлює залежність між витратою повітря  $Q_1$  та витратою продукту-газу  $Q_2$  і використовується для контролю інтен-

сивності окисних реакцій у процесі піролізу–газифікації. Другий канал пов'язує витрату вихідної сировини  $G_{\square}$  з витратою продукту-газу  $Q_2$ , що дозволяє регулювати швидкість та глибину розкладання сировини. Третій канал описує вплив витрати рециркуляційного газу  $Q_3$  на витрату продукту-газу  $Q_2$  і призначений для підтримання заданого рівня реакцій у системі.

Наступні три канали відображають вплив витрат повітря  $Q_1$ , вихідної сировини  $G_{\square}$  та рециркуляційного газу  $Q_3$  на температуру піролізу. Це забезпечує можливість контролю та регулювання температури процесу  $t$  з метою створення оптимальних умов розкладання сировини та формування продуктів із заданими характеристиками. Останні два канали встановлюють зв'язок між витратою повітря  $Q_1$ , витратою вихідної сировини  $G_{\square}$  та складом продукту-газу, що є важливим для забезпечення стабільних якісних показників кінцевого продукту. Параметричну схему моделі наведено на рис. 2.

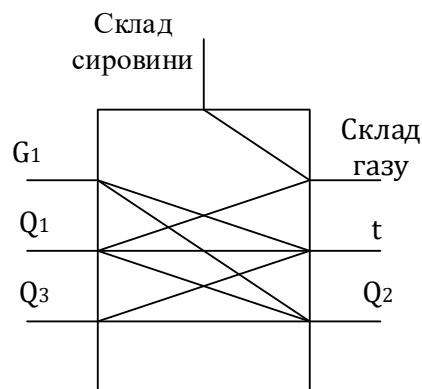


Рис. 2. Параметрична схема

Піролізна установка за конструктивними та тепломасообмінними характеристиками має значну подібність до топків з киплячим шаром. Як правило, динамічні характеристики таких систем визначаються на основі рівнянь збереження маси та енергії. Аналогічний підхід може бути застосований і для піролізної установки, для якої доцільно записати відповідні балансові співвідношення.

Для піролізної установки можна записати:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = G_{\square} Q_{\square}^p + Q_1 h_1 + Q_3 Q_{\square}^p - Q_2 Q_{\square}^p - I_{ash} - I_R \quad (1)$$

де  $T_L$  – температури шару та газу;  $\rho_L, \rho_g$  – насипні щільності шару та газу;  $H_L$  – висота шару;  $S_L$  – площа дзеркала реакції;  $G_{\square}$  – витрата сировини (шихти);  $C_L, C_g$  – теплоємність матеріалу шару та газу;  $Q_{\square}^p$  – теплотворна здатність сировини.

вини;  $Q_n^p$  – теплотворна здатність синтезу газу та рециркуляційного газу;  $I_{ash}, I_R$  – втрати теплоти з золюю і випромінюванням;  $Q_1, Q_2, Q_3$ , – витрата повітря, продукт-газу, рециркуляційного газу.

Після того, як складові рівняння (1) представлені у вигляді прирощень, рівняння набуває наступного вигляду:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = \Delta G_{in} \bar{Q}_n^p + \bar{G}_{in} \Delta Q_n^p + \Delta Q_1 \bar{c}_1 \bar{T}_1 + \Delta Q_3 \bar{c}_L \bar{T}_L + \bar{Q}_3 \bar{c}_L \Delta T_L - \Delta Q_2 \bar{c}_L \bar{T} - \bar{Q}_2 \bar{c}_L \Delta T_L \quad (2)$$

або

$$\begin{aligned} \frac{S_L \rho_L H_L}{\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3} \frac{dT_L}{dt} + \Delta T_L = \frac{\bar{c}_u (T_L - \bar{T}_u)}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta G_{in} + \\ + \frac{\bar{G}_1}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_n^p + \frac{\bar{c}_1 (T_L - \bar{T}_1)}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_1 + \\ + \frac{\bar{T}_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_3 - \frac{\bar{T}_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Рециркуляційний газ являє собою частину продукт-газу, яка повертається до установки з метою повторного використання в технологічному процесі. За своїми енергетичними характеристиками він має таку саму теплотворну здатність, як і основний продукт-газ, а його параметри визначаються температурним режимом процесу піролізу.

З огляду на це регульований об'єкт, що описує взаємозв'язки в каналах « $Q_3 - T_L$ », « $Q_2 - T_L$ », « $Q_1 - T_L$ » та « $G_{in} - T_L$ », доцільно моделювати у вигляді інерційної ланки першого порядку з транспортним запізнюванням. Наявність запізнювання зумовлена скінченною довжиною трубопроводів, через які здійснюється подача та відведення газових потоків, що призводить до часової

затримки між зміною керуючих впливів і відповідною реакцією температури в системі.

Із закону збереження маси випливає:

$$\frac{dm}{dt} = G_{in} + Q_1 + Q_3 - Q_2, \quad (4)$$

З рівняння (4) з урахуванням положень хімічної кінетики досліджуваного процесу випливає, що регульований апарат за каналами « $Q_1 - Q_2$ », « $G_{in} - Q_2$ » та « $Q_3 - Q_2$ » доцільно розглядати як інерційну ланку. Інерційні властивості системи зумовлені швидкістю поширення фронту термодеструкції вихідної сировини в реакційному об'ємі.

Зв'язки між вхідними та вихідними параметрами передавальних функцій наведено в табл. 4.1. Значення відповідних коефіцієнтів отримано на основі розрахунків процесу піролізу з урахуванням режимних і конструктивних параметрів установки.

Оскільки формула для розрахунку бруто-виходу продукт-газу за структурою збігається з формулою для вихідної сировини та залежить від кількості поданого повітря, склад утвореного газу визначається як складом сировини, так і об'ємом повітря, що подається в реакційну зону. Для кількісної оцінки складу продукт-газу обрано параметр його теплотворної здатності. Теплотворна здатність газу залежить від співвідношення між витратами сировини та повітря, причому за певних значень цього співвідношення її зміна має нелінійний характер.

У результаті реалізації такого регульованого процесу, в якому керування здійснюється за каналами «витрата повітря – склад газу» та «витрата сировини – склад газу», нелінійні властивості системи істотно впливають на кінцевий склад

Таблиця 1

Зв'язки між вхідними та вихідними параметрами передавальних функцій

|                                                  | витрата<br>повітря<br>$Q_1$ , моль/с                                    | витрата<br>сировини<br>$G_1$ , моль/с                                   | витрата<br>рециркуляційного<br>газу<br>$Q_3$ , моль/с | теплотворна<br>здатність сировини<br>$Q_n^p$ |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| витрата продукт-газу<br>$Q_2$ , моль/с           | $W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}$                                            | $W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}$                                            | $W(s) = \frac{1.83}{T_1 s + 1}$                       | –                                            |
| температура піролізу<br>$T_L$ , К                | $W(s) = \frac{600}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$                              | $W(s) = \frac{300}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$                              | $W(s) = \frac{300}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$            | $W(s) = \frac{200}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$   |
| Теплотворна<br>здатність<br>продукт-газу $Q_n^p$ | $W(s) = \frac{k \left( \frac{Q_2}{G_1} \right)}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$ | $W(s) = \frac{k \left( \frac{Q_2}{G_1} \right)}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$ | –                                                     | $W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$     |



продукт-газу та його теплотворну здатність. Аналіз результатів експериментальних і розрахункових досліджень показав, що лінійні моделі не забезпечують адекватного опису цих залежностей у всьому діапазоні робочих режимів.

З урахуванням виявленого характеру взаємозв'язку між параметрами процесу було прийнято квадратичну залежність теплотворної здатності продукт-газу від співвідношення витрат вихідної сировини та повітря, яка дозволяє коректніше відобразити нелінійну поведінку системи та підвищити точність математичної моделі:

$$Q_H^p = Q_{H0}^p \left( 1 - k(Q_1 - G_{ш} V_0)^2 \right), \quad (5)$$

де  $Q_H^p$  – теплотворна здатність продукт-газу;  $V_0$  – об'єм повітря необхідний для піролізу 1 моль вихідної сировини. Залежить від складу сировини;  $Q_{H0}^p$  – максимально можлива теплотворна здатність, що залежить від складу вихідної сировини, на даному етапі прийнято  $Q_{H0}^p = 1$ ;  $k$  – коефіцієнт пропорційності, який визначається розрахунковим або експериментальним шляхом для конкретного складу сировини. На цьому етапі прийнято  $k = 0.2$ .

Проведені дослідження показали, що енергетична ефективність процесу піролізу визначається насамперед двома ключовими параметрами – витратою вихідної сировини та її теплотворною здатністю. Зі збільшенням витрати сировини, а також зі зростанням її теплотворної здатності, підвищується кількість енергії, що виділяється внаслідок окисних реакцій у процесі піролізу.

Зазначений взаємозв'язок має суттєвий вплив на тепловий баланс установки та режими її роботи. Для кількісного опису цієї залежності була сформульована математична модель, яка базується на відповідних рівняннях і враховує спільний вплив витрати сировини та її теплотворної здатності на інтенсивність енерговиділення і, відповідно, на ефективність процесу піролізу:

$$Q = \bar{Q}_i^p \cdot \Delta G_1 + \bar{G}_1 \cdot \Delta Q_i^p + \Delta Q_i^p \cdot \Delta G_1. \quad (6)$$

Експериментальні дослідження показали, що значення сталих часу та величини запізнення в системі керування істотно залежать від геометричних параметрів установки та конструктивних особливостей обладнання, у зв'язку з чим вони мають визначатися індивідуально для кожної конкретної піролізної установки. На поточному етапі досліджень для проведення імітаційного моделювання були прийняті значення сталих часу, що узгоджуються з експериментальними даними, отриманими в попередніх роботах, а саме:

$T_1 = 400$  с,  $T_2 = 500$  с та параметр транспортного запізнення  $\tau = 10$  с.

У процесі моделювання об'єкта керування було встановлено, що через канал « $Q_3 - Q_2$ » можливе виникнення режимів роботи, за яких система переходить зі стійкого стану в нестійкий. Це зумовлено наявністю позитивного зворотного зв'язку, що формується при певних умовах функціонування установки. Поведінка об'єкта керування за цим каналом визначається співвідношенням між витратою вихідної сировини  $G_{ш}$  та витратою рециркуляційного газу  $Q_3$ , що необхідно враховувати при синтезі та налаштуванні системи автоматичного керування.

На рисунках 3–6 наведено результати моделювання процесів регулювання за умов дії різних збурень, зокрема зміни витрати продукт-газу та зміни складу вихідної сировини. До розглянутих збурювальних впливів належать зміна витрати продукт-газу, виражена в моль/с, а також відхилення теплотворної здатності вихідної сировини на  $\pm 20$  % від номінального значення.

Зазначені збурення можуть прикладатися як окремо, так і в різних комбінаціях, що дозволяє оцінити чутливість системи керування до кожного з факторів і їх сумарного впливу. Подані на графіках результати відображають перехідні процеси регулювання у випадку одночасної дії всіх збурень, що відповідає найбільш несприятливим умовам експлуатації та дає змогу комплексно оцінити динамічні властивості та робастність системи автоматичного керування.

Наведені результати демонструють коректну реакцію системи управління зовнішнім обуренням. Особливо ефективно її функціонування проявляється при дії обурень, спрямованих у різні боки ( $\Delta Q_2 = -0,5$  моль/с,  $\Delta Q_{H ш}^p = -20$  % та  $\Delta Q_2 = 0,5$  моль/с,  $\Delta Q_{H ш}^p = 20$  %).

**Висновки.** Розроблено імітаційну математичну модель установки термодеструкції органічних речовин, яка базується на її конструктивному та технологічному описі і дозволяє досліджувати динамічні властивості процесу. Основні канали регулювання моделі можна розглядати як інерційну ланку першого порядку з транспортним запізненням. Параметри цієї ланки, такі як сталий час і величина запізнення, залежать від геометричних розмірів установки і потребують індивідуальної настройки для кожного конкретного об'єкта.

Встановлено, що на етапі моделювання існують режими роботи, за яких система може переходити зі стійкого стану в нестійкий унаслідок

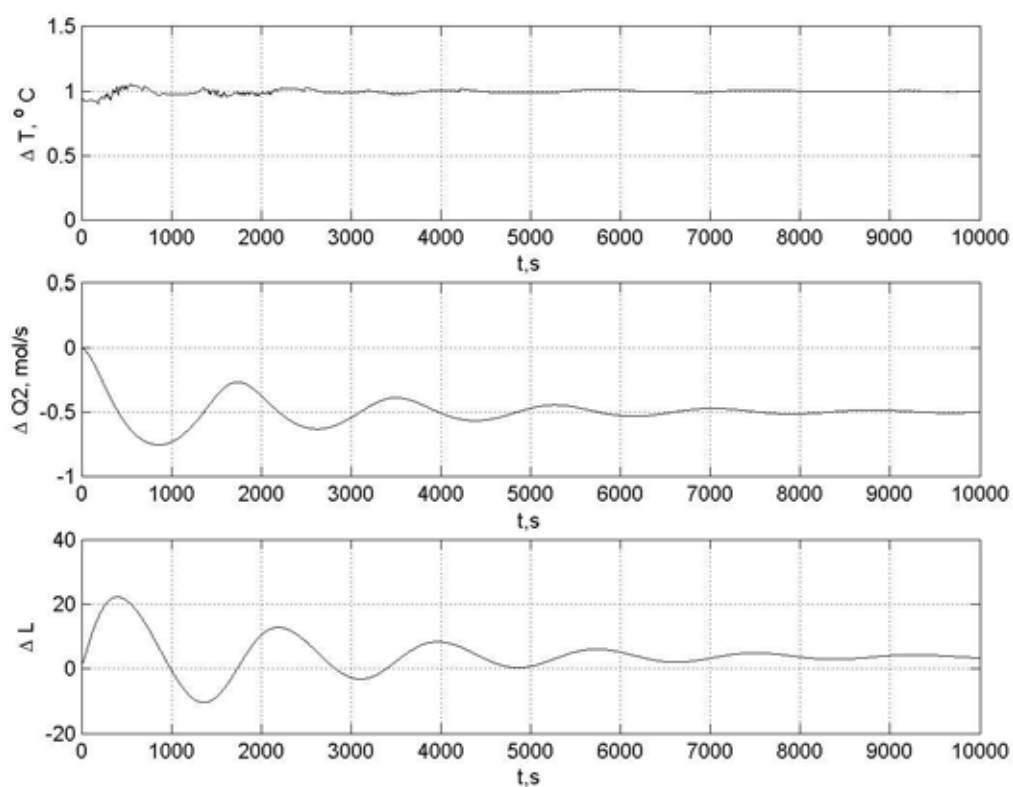


Рис. 3. Відхилення регульованих величин піролізної установки. Обурення  $\Delta Q_2 = -0,5$  моль/с ,

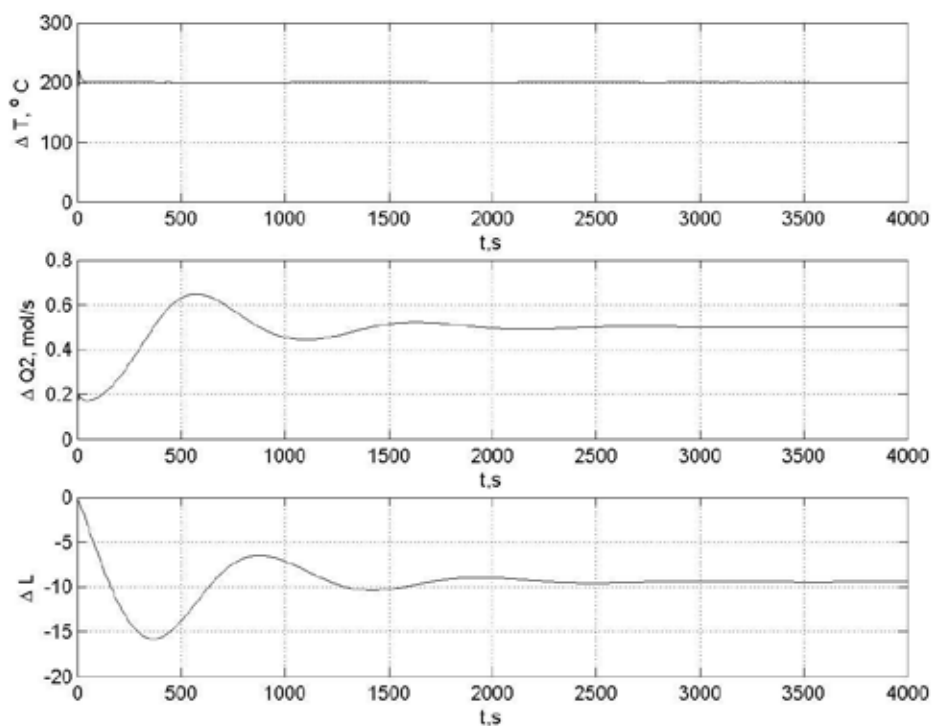


Рис. 4 Відхилення регульованих величин піролізної установки.  
Обурення  $\Delta Q_2 = 0,5$  моль/с ,  $\Delta Q_{HIII}^p = -20\%$

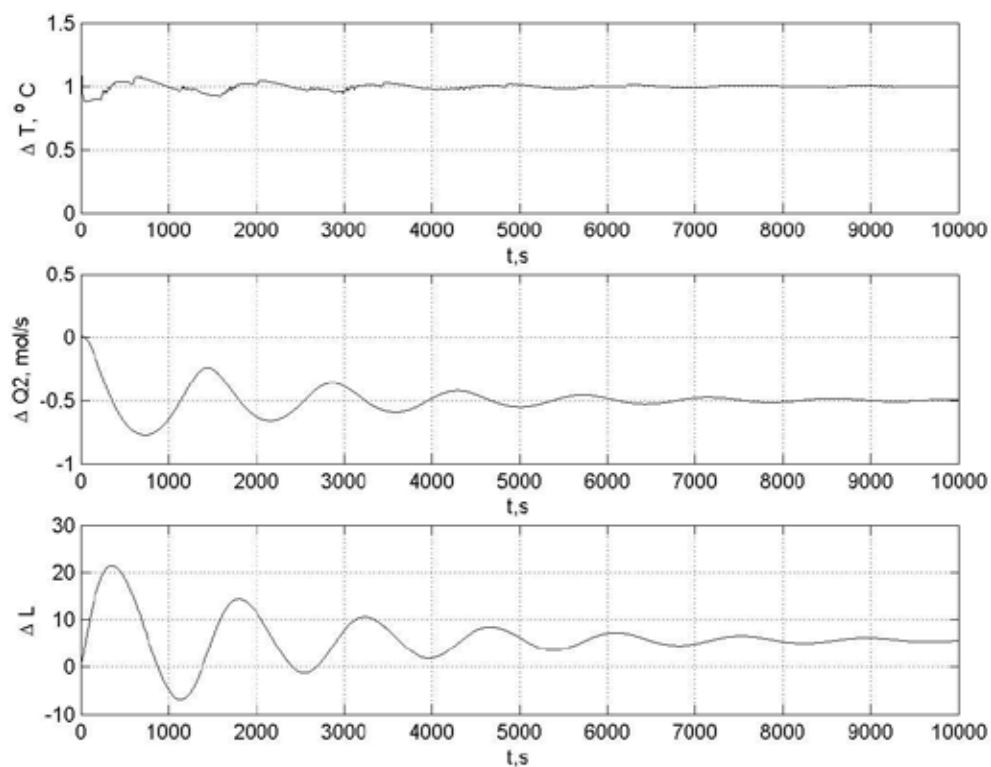


Рис. 5. Відхилення регульованих величин піролізної установки.  
Обурення  $\Delta Q_2 = -0,5$  моль/с,  $\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = 20\%$

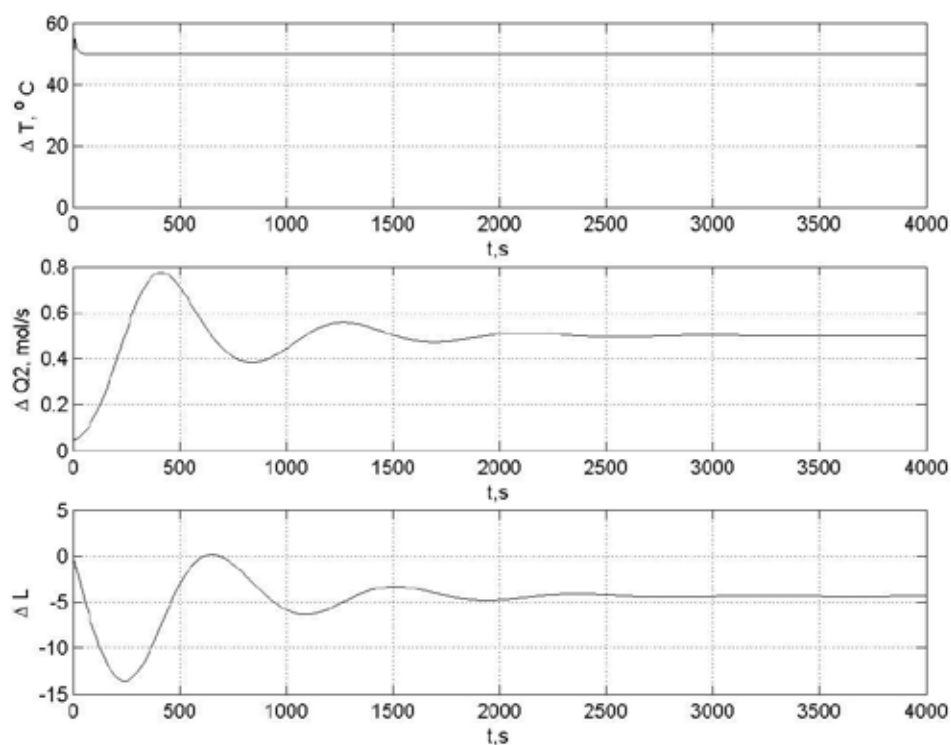


Рис. 6. Відхилення регульованих величин піролізної установки.  
Обурення  $\Delta Q_2 = 0,5$  моль/с,  $\Delta Q_{H\text{ ш}}^p = 20\%$

наявності позитивного зворотного зв'язку. Цей ефект визначається співвідношенням між витратами вихідної сировини та витратою рециркуляційного газу. Водночас наявність регуляторів дозволяє стабілізувати технологічний процес піролізу на заданих значеннях основних параметрів.

Показано, що для моделювання автоматичної системи керування достатньо застосовувати одноконтурні регулятори. Вимкнення будь-якого з регуляторів призводить до погіршення якості регулювання, проте система загалом зберігає стабільність функціонування, що свідчить про її робастність і резерви регулювальної стійкості.

#### Список літератури:

1. Brunetkin O., Maksymov M. V., Maksymenko A., Maksymov M. M. (2019). Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4/6 (100). P. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176422>
2. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf)
3. Brown R. C. Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power 2019, Wiley, 408 p. ISBN: 978-1-119-41757-6
4. Perrot J.-F., Subiantoro A. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand Sustainability. 2018. 10(9). 3114. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093114>
5. Nadia H.L., Aboyade A.O., Knoetze J.H., Görgens J.F. Process Efficiency of Biofuel Production Via Gasification and Fischer–Tropsch Synthesis [Text] Fuel, Volume 109, 2013, P. 484–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.013>
6. Sikarwar V.S., Zhao M., Clough P. and others. An overview of advances in biomass gasification Energy Environ. Sci., 2016, 9, 2939–2977. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6EE00935B>
7. Czajczyńska D., Anguilano L., Ghazal H., Krzyżyńska R., Reynolds A.J., Spencer N., Jouharaa H. Potential of Pyrolysis Processes in the Waste Management Sector Thermal Science and Engineering Progress, Volume 3, September 2017, Pages 171–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>
8. Sharuddin S.D.A., Abnisa F., Wan M.A. Wan Daud, Aroua M.K. A review on pyrolysis of plastic wastes Energy Conversion and Management 115 (2016) 308–326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
9. Huang Y.-F., Chiueh P.-T., Lo S.-L. A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass Sustainable Environment Research. Volume 26, Issue 3, May 2016, Pages 103–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.04.012>
10. Brunetkin V., Davidov V.O. Kombinovaniy sharoviy gazogenerator. [Combined gas generator with a layer] The 22th International scientific and practical conference “Modern theories and improvement of world methods” (June 06 – 09, 2023) Helsinki, Finland. International Science Group. 2023. p. 440–443. ISBN – 979-8-88992-687-0. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22>

#### **Brunetkin O. I., Muzyka D.O., Taffi V.V. SIMULATION MATHEMATICAL MODEL OF GASIFICATION OF ORGANIC RAW MATERIALS**

*Addresses issues related to the organization of the slow pyrolysis process of organic substances in the general case of an unknown and variable composition. The relevance of the study is determined by considering the possibility of using various organic wastes (municipal, agricultural, industrial) without prior sorting and drying to obtain secondary energy resources of a known (controlled) composition. The novelty of the work lies in the development of a model of a method for controlled pyrolysis or gasification of organic substances with a minimal amount of solid residues and with the maximum calorific value of the resulting mixture of combustible gases.*

*A simulation-based mathematical model of an installation for the thermodestruction of organic substances has been developed. The model is based on the structural and technological description of the installation and makes it possible to study the dynamic properties of the process. The main control channels of the model can be considered as a first-order inertial element with transport delay. The parameters of this element, such as the time constant and the magnitude of the delay, depend on the geometric dimensions of the installation and require individual tuning for each specific object.*

*It has been established that, at the modeling stage, there are operating modes under which the system can transition from a stable to an unstable state due to the presence of positive feedback. This effect is determined by the ratio between the consumption of the feedstock and the flow rate of the recirculated gas. At the same*

*time, the presence of controllers makes it possible to stabilize the technological pyrolysis process at specified values of the main parameters. It is shown that single-loop controllers are sufficient for modeling the automatic control system.*

*Disabling any of the controllers leads to a deterioration in control quality; however, the system as a whole retains operational stability, which indicates its robustness and reserves of control stability. A scheme for real-time monitoring of the feedstock composition during the pyrolysis (gasification) process is proposed. Knowledge of the composition makes it possible to control its processing in order to: a) organize an optimal gasification process aimed at maximizing both the quantity and the energy value of the mixture of gaseous reaction products; b) control the consumption of the processed feedstock to obtain the required amount of gaseous product at any given moment in time.*

**Keywords:** *thermochemical conversion, organic matter, controlled pyrolysis, simulation-based mathematical model, combined gas generator.*

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Воїнов О.П.**

<https://orcid.org/0000-0001-7548-4212>

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Елькін Ю.Г.**

<https://orcid.org/0000-0001-7677-377X>

Одеська державна академія будівництва та архітектури

## ПРО ВПЛИВ ПРОЦЕСУ ЗОВНІШНЬОЇ ЕРОЗІЇ НА РЕСУРС ПАРОВИХ КОТЛІВ З КИПЛЯЧИМ ШАРОМ

*Метою статті є аналіз впливу процесу зовнішньої ерозії у парових котлах із киплячим шаром на їх ресурс. Парові котли низькотемпературного киплячого шару мають ряд властивостей, що формують істотні їх переваги перед паровими котлами традиційних типів. У статті проаналізовано характерні приклади зміни траєкторій ресурсу елементів парового котла в часі та надано рекомендації щодо їх вибору в умовах реальної експлуатації парових котлів. Вивчено вплив основних конструктивних та режимних факторів на інтенсивність процесу зовнішньої ерозії у парових котлах із киплячим шаром, а також вплив процесу зовнішньої ерозії на ресурс котлів. У результаті дослідження виявлено, що із зменшенням розміру частинок інерту зовнішня ерозія посилюється з прискоренням. Управління ресурсом парового котла через управління розміром частинок інерту є на практиці складним науково-технічним завданням, оскільки поточний розмір частинок визначається впливом ряду факторів. Збільшення швидкості псевдозрідження підвищує інтенсивність процесу зовнішньої ерозії, причому тим більше, чим дрібнішими є частинки інерту. Реальну можливість управління швидкістю псевдозрідження відкриває застосування двоступінчастого горіння в топці з киплячим шаром. У поверхнево-охолоджуваних топках збільшення теплової потужності надшарового об'єму зумовлює підвищення в ньому температури топкового середовища; у об'ємно-охолоджуваних топках – практично не обумовлює подібного підвищення температури. В об'ємі киплячого шару є горизонтальний шар, який містить у собі зону максимальної інтенсивності зовнішньої ерозії. Зовнішня ерозія є найбільш інтенсивною в середній, приосевій частині об'єму киплячого шару. При віддаленні від неї вона знижується. Виконані дослідження дозволили встановити характеристики режиму роботи парового котла з киплячим шаром, в залежності від її умов, що при практичному застосуванні дозволить запропонувати шляхи та засоби підвищення технологічної ефективності котлів з киплячим шаром та підвищення їх ресурсу, у тому числі суттєвого підвищення стійкості поверхонь нагріву до впливу зовнішньої ерозії.*

**Ключові слова:** паровий котел, управління ресурсом, киплячий шар, псевдозрідження, зовнішня ерозія, частинка інерту.

**Постановка проблеми.** Технологічний процес у парових котлах (ПК) з киплячим шаром (КШ) відрізняється високою розмірністю [1]. Вплив на нього надають численні фактори, внутрішні і зовнішні, детерміновані і випадкові, діючі безперервно і періодично, слабкі та сильні. Серед них деякі вивчені відносно глибоко, інші майже не вивчені. Ці обставини зумовили виникнення безлічі завдань, що стоять на шляху до широкого, впевненого застосування ПК з КШ у станційній та в промисловій енергетиці взагалі, в енергетиці вітчизняної зокрема [2]. Згадані завдання сформу-

вали важливу та складну науково-технічну проблему вивчення технології котельно-топкового КШ, узагальнення отриманих результатів, складання розрахунково-методичних підходів і засобів для конструювання ПК з КШ і, нарешті, виробництва та широкого використання цих котельно-топкових систем [3 – 5].

ПК, що діють за технологією низькотемпературного КШ, мають унікальний набір властивостей, що формують загальну істотну перевагу їх перед ПК традиційних типів по ряду важливих технологічних властивостей, перш за все екологічних.

Дослідження котельно-топкового технологічного процесу, що протікає в КШ, пошук методів, шляхів та засобів його вдосконалення є актуальним науково-технічним завданням нині й у перспективі [6, 7].

Зупинимося на короткому розгляді основних із згаданих особливостей і висуваних ними основних завдань.

1). Низький рівень температури топкового середовища ( $750 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) впливає наступним чином:

- знижує теплосприйняття топкових радіаційних екранів, розташованих над КШ ( $Q_{\text{рад}}$ );
- знижує вміст оксидів азоту у топкових газах ( $\text{NO}_x$ ).

2). Занурені в КШ поверхні нагріву, включаючи топкові екрани,

- збільшують теплосприйняття топки;
- збільшують продуктивність ПК ( $D$ ) та пряму віддачу топки ( $\beta_T$ );
- збільшують ККД топки та ККД ПК;
- охолоджують КШ, дозволяють підвищити в ньому об'ємну щільність тепловиділення ( $Q/V_T$ );
- дозволяють збільшити компактність топки та ПК.

3). Двоступінчасте спалювання палива (в об'ємі КШ і в надшаровому просторі)

- знижує об'ємну щільність тепловиділення в КШ ( $Q/V_{\text{КС}}$ );
- підвищує температуру топкових газів середню ( $v_T$ )<sup>CP</sup> та на виході з топки ( $v_T$ );
- підвищує  $Q_{\text{рад}}$ ;
- підвищує  $D$ ;
- підвищує вихід  $\text{NO}_x$ .

4). При спалюванні палива з високим вмістом летких (смолистих речовин) можлива їхня конденсація на відносно холодних поверхнях нагріву, у надшаровому просторі камери згоряння.

5). Використання твердих присадок (вапняку, доломіту) дозволяє спалювати високосірчисте паливо при дуже низькому вмісті оксидів сірки в відхідних газах.

6). Висока інтенсивність зовнішньої ерозії скорочує довговічність труб топкових екранів, занурених у КШ.

7). Інтенсивність зовнішньої ерозії залежить від дії ряду факторів, зокрема кута атаки частинками інерту труб у поверхнях нагріву.

8). Зникає необхідність застосовувати хімічне очищення відхідних газів.

9). Існує необхідність застосовувати механічне очищення відхідних газів.

10). З'являється завдання створення системи засобів розпалювання ПК.

11). З'являється завдання захисту елементів ПК від термічного перевантаження в позаштатних режимах функціонування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Ресурс ( $R_c$ ) ПК – поняття комплексне: він фактично визначається  $R_c$  того елемента агрегату, в якого він ( $R_c$ ) є мінімальним (рис. 1) [8, 9]. Показана залежність  $R_c(T)$  для п'яти важливих елементів ПК, тобто таких, при відмові кожного з яких агрегат підлягає зупинці. У кожного період реалізації  $R_c$  (витрачання запасу працездатності) різний:

$$(0-T_1) > (0-T_2) > (0-T_3) > (0-T_4) > (0-T_5).$$

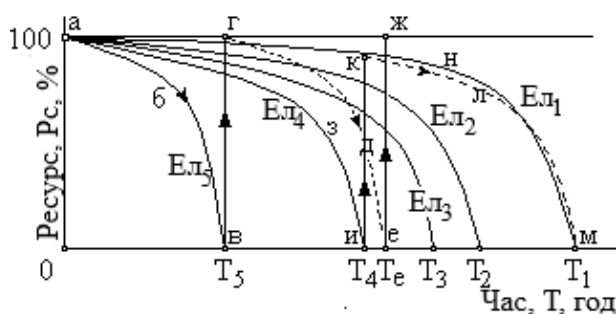


Рис. 1. Ресурс елементів і ресурс ПК в цілому

У цьому випадку  $R_c$  ПК визначає елемент  $Ел_5$ , що має мінімальний  $R_c \equiv (0-T_5)$ . Протягом цього періоду  $R_c$  ПК і  $R_c$  його елемента  $Ел_5$  змінюються за графіком "а"–"б"–"в".

По досягненні моменту часу  $T_5$   $R_c$  елемента (отже і ПК) виявляється вичерпаним. ПК слід зупинити для проведення відновного ремонту  $Ел_5$  або заміни його новим елементом. Оскільки  $R_c$   $Ел_5$  є меншим залишкового  $R_c$  котла в цілому –  $(T_5-T_1)$ , доцільним є  $Ел_5$  замінити новим, тобто підняти його  $R_c$  від 0 до 100%, що показано на рис. 1 лінією "в"–"г". Таким чином, з моменту  $T_4$  новий  $Ел_5$  та інші елементи залишаються в роботі. Графік  $R_c(T)$   $Ел_5$  показаний пунктирною лінією "г"–"д"–"е" (відповідною графіку "а"–"б"–"в").

В наступний час  $R_c$  котла визначається  $R_c$  елемента  $Ел_4$ , який спрацьовується згідно з графіком "а"–"з"–"и". У момент  $T_4$  необхідно ПК зупинити для відновлення  $Ел_4$ .

У цьому випадку становище інше. Якщо  $Ел_4$  замінити новим елементом, його  $R_c$  в годинах  $(0-T_4)$  (при його відліку від моменту  $T_4$ ) закінчиться пізніше моменту  $T_1$ , до якого розрахований  $R_c$  найбільш довговічного елемента ПК –  $Ел_1$  (іншими словами,  $R_c$  ПК загалом). Тобто, ПК довелося б вивести з експлуатації в момент  $T_1$ , а залишкова частина  $R_c$   $Ел_4$  залишилася б не використаною.



Оскільки це не доцільно, слід вибрати один із таких варіантів:

- провести (якщо це можливо) відновлювальний ремонт Ел<sub>4</sub> до набуття їм Рс необхідного рівня, показаного на рис. 1 відрізком "и"–"к";
- встановити новий Ел<sub>5</sub>, виготовлений із менш стійкого матеріалу, із забезпеченням Рс, розрахованого на період (Т<sub>4</sub>–Т<sub>1</sub>).

На рис. 1 показаний перший із цих варіантів. Відновлювальним ремонтом елемента Ел<sub>4</sub> його Рс піднято до рівня "и"–"к". Траєкторія Рс(Т) оновленого Ел<sub>4</sub> йде за графіком "к"–"л"–"м" і завершується одночасно з траєкторією "а"–"н"–"м" Ел<sub>1</sub>, тобто котла в цілому.

Після моменту часу Т<sub>4</sub> працюють усі елементи. У моменти Т<sub>е</sub>, Т<sub>3</sub>, Т<sub>2</sub> необхідно буде вирішувати питання про варіант оновлення елементів Ел<sub>5</sub>, Ел<sub>3</sub> та Ел<sub>2</sub>.

У наведеному прикладі траєкторії Рс(Т) п'яти Ел котла, заради спільності розгляду, взяті випадково. У реальних умовах зазначені траєкторії слід вибирати на основі оптимізації, обравши в якості цільової функції мінімум сумарних затрат, з урахуванням екологічної характеристики обладнання (рис. 2) [10]. Через З<sub>пн</sub>, З<sub>р</sub> і З<sub>с</sub> позначено затрати на поверхні нагріву, на ремонтне обслуговування та сумарні затрати.

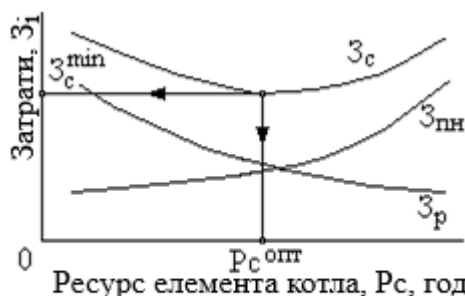


Рис. 2. Вплив ресурсу елемента котла на затрати

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз впливу основних конструктивних та режимних факторів на інтенсивність процесу зовнішньої ерозії у парових котлах із киплячим шаром, а також впливу процесу зовнішньої ерозії на ресурс цих котлів.

**Виклад основного матеріалу.** Зовнішня ерозія (ЗЕ) – процес високої інтенсивності. У ПК з бульбашковим КШ при сприятливому поєднанні дії впливаючих факторів занурені труби поверхонь нагрівання втрачають кілька десятків міліметрів товщини стінки на рік [11, 12]. У ПК з циркулюючим КШ у сприятливих умовах витончення стінки може бути у кілька разів більше. Ця обставина

обмежує можливість екранування стін топки її верхньою частиною.

У зв'язку з цим Рс поверхонь нагріву, що стикаються з інертом, відносно невеликий; він на порядок менший Рс інших Ел агрегату. Це обставина є однією з причин, що ускладнюють широке використання ПК з КШ в енергетиці світу [13].

Інтенсивність процесу ЗЕ ( $I_g$ ), як було зазначено вище, визначається дією численних факторів. Основними в їх числі є розмір частинок інерту ( $d_q$ ), швидкість псевдозрідження ( $u$ ), місцезнаходження труби по висоті КШ ( $H_i / H_0$ ), відносна відстань труби від осевої вертикальної поздовжньої площини топки ( $R_i / R$ ), діаметр труби ( $d_{tr}$ ), кут атаки поверхні труби потоком частинок ( $\alpha$ ), ерозійна стійкість матеріалу труби ( $E_m$ ), ерозійна агресивність частинок інерту ( $E_i$ ) [14, 15].

Крім перелічених факторів на  $I_g$  суттєво впливає форма частинок інерту. Вона змінюється під впливом внутрішньої ерозії від вугластої у свіжих частинок до округлої у частинок, які попрацювали тривалий час.

Нижче наведено аналіз розкритих закономірностей впливу основних чинників на Рс ПК.

А) Вплив розміру частинок інерту характеризує графік  $I_g(d_q)$  (рис. 3).

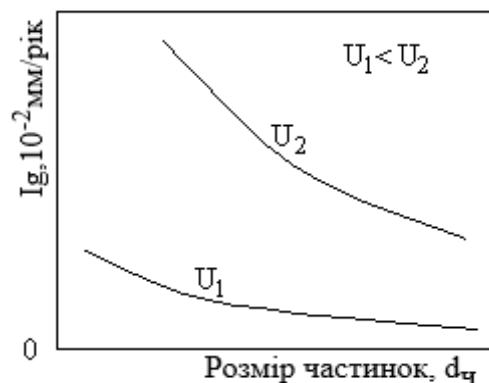


Рис. 3. Характер впливу розміру частинок на інтенсивність ЗЕ

З аналізу цієї залежності випливає, що для труб зі сталі Ст20 при  $d_{tr} = 8\text{--}18$  мм, при інерті у вигляді дроблянки шамоту її (залежність) можна апроксимувати рівнянням

$$I_g = 8,365 d_q^{-0,815} - 3,2 \text{ (мм)}.$$

Із зменшенням  $d_q$  ЗЕ посилюється із прискоренням:  $\frac{dI_g}{dd_q} > 0$ .

Збільшення  $U$  веде до підвищення  $I_g$ . При цьому, для кожного значення  $d_q$  крутість графіка  $I_g(d_q)$  зростає:  $\frac{dI_g}{dU} > 0$ .

Особливий інтерес представляє той факт, що вплив  $d_q$  на коефіцієнт тепловіддачі від КШ до зануреної поверхні нагріву (зовнішньої тепловіддачі) –  $\alpha_{kc}$  – аналогічно залежності  $I_g(d_q)$ :  $I_g(d_q) \equiv \alpha_{kc}(d_q)$ . Тобто зменшення  $d_q$  з метою посилення теплообміну неминує призводити до посилення ЗЕ. І тільки використання впливу інших факторів та їх комбінацій дозволяє при цьому отримати збільшення теплообміну більше, ніж посилення інтенсивності ЗЕ, тобто досягти  $\frac{d\alpha_{kc}}{dl_g} > 0$ .

Слід зазначити суттєвий вплив  $d_q$  на Рс котлів з КШ.

Управління ресурсом ПК через управління розміром частинок інерту є на практиці складним науково-технічним завданням, оскільки поточний  $d_q$  визначається впливом низки факторів:

- гранулометричним складом палива протягом кількох годин до моменту розгляду;
- режимом внутрішнього зносу (внутрішньої ерозії – знесення частинок у КШ), протягом того ж періоду часу;
- режимом винесення дрібних частинок із шару газовим потоком;
- режимом несення навантаження котлом протягом зазначеного періоду та іншими.

Основним джерелом збурення параметра  $d_q$  є перший і четвертий з числа перерахованих чинників. Їх вплив носить випадковий характер за напрямом, за амплітудою та за швидкістю зміни кожного. Практично параметр оперативно не керований. Єдине доступне обмеження – обмеження зверху розміру частинок палива, а отже, і частинок інерту.

У разі застосування інерту, що вноситься зовні, на розмір частинок додатковий вплив мають властивості і режим зливу відпрацьованого інерту і добавки свіжого. Причому в цьому випадку зазначені операції вносять різке та значне (ударного характеру) збурення в хід процесу ЗЕ.

Б) Вплив швидкості псевдозрідження характеризує графік  $I_g(U)$  (рис. 4). З аналізу цієї залежності випливає, що для труб зі сталі Ст20 при  $d_{тр} = 18$  мм збільшення  $U$  підвищує  $I_g$ , причому тим більше, чим дрібнішими є частинки інерту.

Функція  $I_g(U)$  у першій половині вивченого діапазону  $U$  характеризується позитивним  $\frac{dI_g}{dU}$ , а в другій половині – негативним  $\frac{dI_g}{dU}$ .

Фактор  $U$  – один із найбільш активних зовнішніх факторів з числа впливаючих на  $I_g$ . Тому використовувати його з метою управління  $I_g$  не уявляється можливим.



Рис. 4. Характер впливу швидкості псевдозрідження на інтенсивність ЗЕ

Привертає увагу те, що вплив  $U$  носить комплексний характер:

- впливає безпосередньо на  $I_g$  (рис. 4);
- впливає на інтенсивність внутрішньої ерозії, тобто впливає на середній розмір частинок інерту (рис. 3);
- впливає на структуру двофазного КШ, особливо загальмованого зануреними в нього трубами поверхні нагріву, що впливає на режим ЗЕ в об'ємі шару.

Разом з тим, вкажемо на реальну можливість управління  $U$  в деякому діапазоні її значень, протяжність якого визначається місцевими умовами. Цю можливість відкриває застосування двоступінчастого горіння в топці з бульбашковим КШ. При цьому, перший ступінь реалізується в об'ємі КШ при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha_{t1} < 1$ , а другий – в надшаровому об'ємі топки при  $\alpha_{t2}$ , що доповнює  $\alpha_{t1}$  до значення  $\alpha_t$ , прийнятого для процесу горіння в цілому:

$$\alpha_t = \alpha_{t1} + \alpha_{t2}.$$

Двоступінчасте спалювання палива в топці з КШ докорінно змінює топковий процес в цілому.

Фізична модель двоступінчастого процесу горіння в топці з бульбашковим КШ при незмінній її тепловій потужності виглядає так.

Потік повітря при розрахунковому сумарному  $\alpha_t$  ділять на два потоки: первинний при  $\alpha_{t1}$ , що подається через повітророзподільні ґрати (ПРГ) в КШ, і вторинний при  $\alpha_{t2}$ , що подається через сопла вторинного дуття в надшаровий простір топкової камери.

Виділення з КШ і горіння в надшаровому просторі продуктів неповного згорання, що видаються КШ, змінює режим топки по ряду складових, зокрема, відбуваються такі зміни:

- зменшується тепловиділення в об'ємі КШ;
- скорочується теплосприйняття шару;

- збільшується тепловиділення в об'ємі над шаром;
- зростає теплосприйняття топкових екранів над шаром;
- істотних змін зазнає режим, отже, і епюра температури протягом усього шляху повітряно-газового потоку в топковому пристрої.

На рис. 5 наведено епюри температури топкового середовища  $v_t$  для трьох варіантів повітряного режиму топки з КШ:

Варіант 1. Застосовують одноступеневе спалювання палива. В об'ємі шару розвивається максимальна температура  $v_{\text{кш}}$ . У надшаровому об'ємі  $v_t$  знижується, внаслідок теплообміну шару та газів з топковими екранами. Тому  $v_t$  на виході з топки ( $v_t''$ ) мінімальна, а пряма віддача топки ( $\beta_t$ ) максимальна. Епюру  $v_t$  на рис. 5 розміщено під номером 1.

Варіант 2. Застосовують двоступінчасте спалювання, з перенесенням в камеру відносно невеликої частини загального тепловиділення. В об'ємі шару рівень  $v_t$  знижується. У камері, над шаром йде горіння продуктів ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ ), що видаються шаром. Тому тут  $v_t$  підвищується, проходячи свій максимум у місці розташування ядра факела (рис. 5, графік 2). Тому  $v_t''$  підвищується, а  $\beta_t$  знижується в порівнянні з варіантом 1. Епюра  $v_t$  на рис. 5 розміщена під номером 2.

Варіант 3. Застосовують двоступінчасте спалювання, з перенесенням в камеру значної частини загального тепловиділення. В об'ємі шару рівень  $v_t$  знижується значніше, ніж у попередньому варіанті (рис. 5, графік 3). У камері над шаром йде горіння продуктів ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ ), що видаються шаром. Тут  $v_t$  підвищується значніше (ніж у варіанті 2), проходячи свій максимум у місці розташу-

вання ядра факелу. Тому  $v_t''$  ще вище, а  $\beta_t$  нижче, ніж у попередньому варіанті. Епюра на рис. 5 розміщена під номером 3.

Наведений матеріал характерний для поверхнево-охолоджуваних топкок (ПОТ), тобто для топкок традиційного типу. У них, як показано в наведеному аналізі, збільшення теплової потужності  $Q$  надшарового об'єму  $V$  (тобто підвищення об'ємної щільності тепловиділення  $Q/V$  в цьому об'ємі) обумовлює підвищення в ньому  $v_t$  (рис. 5; 2, 3). Тобто, при збереженні низькотемпературного горіння в КШ (із забезпеченням всіх відомих його переваг) у надшаровому просторі горіння переходить у високотемпературну область (з появою всіх відомих її недоліків, перш за все, високого виходу оксидів азоту).

У об'ємно-охолоджуваних топках (ООТ) збільшення  $Q$  надшарового об'єму  $V$  (тобто підвищення  $Q/V$  в цьому об'ємі) практично не обумовлює підвищення в ньому  $v_t$  (рис. 6; 2, 3). Тобто, при збереженні низькотемпературного горіння в КШ в надшаровому просторі горіння залишається в низькотемпературній області. Таким чином, у топці загалом забезпечуються всі відомі переваги низькотемпературного спалювання палива.

Порівняльний аналіз режимів одноступінчастого і двоступінчастого спалювання палива в ПОТ і в ООП з КШ призводить до ряду положень, що представляють значний інтерес для технології та техніки ПК з КШ. Приведемо деякі з них.

Застосування двоступінчастого спалювання палива в топці з КШ відкриває можливість звільнити її повітряний режим від жорсткої залежності від рівня несомої теплової потужності.

Застосування ООТ у поєднанні з двоступінчастим спалюванням палива в топці з КШ відкриває

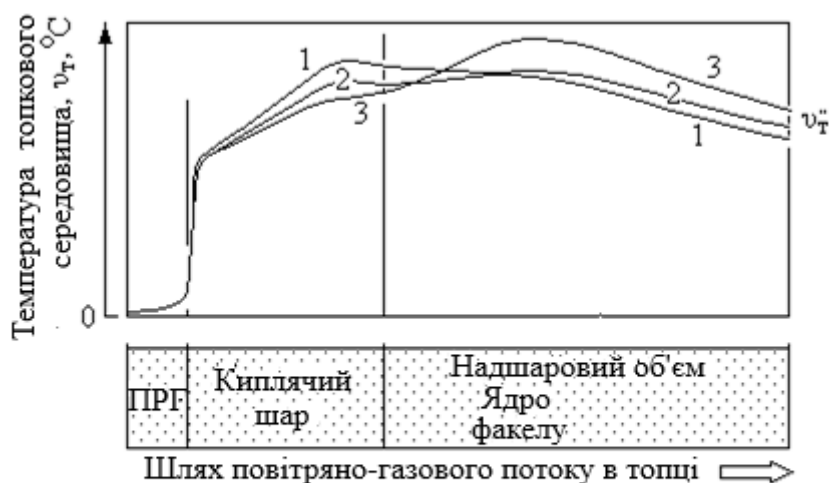


Рис. 5. Епюра температури топкового середовища в ПОТ з КШ при різних повітряних режимах

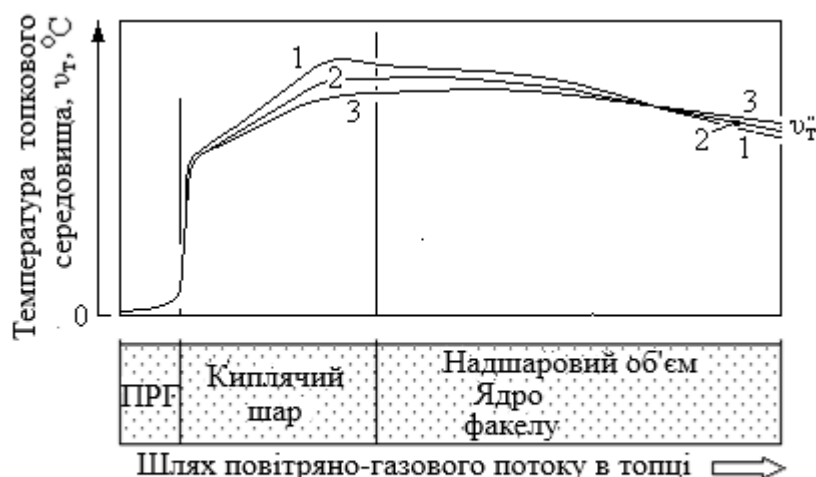


Рис. 6. Елюра температури топкового середовища в ООТ з КШ при різних повітряних режимах

можливість здійснювати в топках з КШ низько-температурне спалювання в обох ступенях топкового процесу, що саме по собі вельми оригінально і технологічно високо продуктивно.

Використання двоступінчастого спалювання палива в ООТ розширює діапазон доступної зміни її повітряного режиму, чим забезпечує можливість управління  $U$ , з метою обмеження зверху  $I_g$ .

В) Вплив розташування труби по висоті КШ ( $H_i / H_o$ ) на  $I_g$  (рис. 7).



Рис. 7. Вплив відносної висоти розташування труби на інтенсивність ЗЕ

З аналізу цієї залежності випливає, що для труб зі сталі Ст20 при  $d_{np} = 8 - 18$  мм її (залежність) можна апроксимувати рівнянням виду

$$I_g = \left[ a - b \left( H_i / H_o \right) + c \left( H_i / H_o \right)^2 \right]^{-1},$$

де  $I_g$  – інтенсивність ЗЕ, мм/рік;

$a, b, c$  – величини, що залежать від умов функціонування ПК з КШ;  $H_i$  – відмітка розташування труби, м;  $H_o$  – відмітка (висота) щільного шару, м.

Зі збільшенням  $H_i$  від нуля до  $H_i = (0,8-1,3)H_o$  ЗЕ посилюється, досягаючи в зазначеному діапазоні максимального значення. При цьому зі збільшенням  $I_g$  позначка розташування максимуму зсувається вправо. Проявляється зазначена в А) дія фактора  $d_{ч}$ .

Викладене свідчить те, що в об'ємі КШ є горизонтальний шар товщиною близько  $0,3H_o$ , який містить у собі зону максимальної  $I_g$ . Поверхні нагріву, розташовані в цьому шарі, зношуються раніше за інших, тому визначають  $R_c$  поверхні нагріву в цілому. Чим вище  $I_g$ , тим тоншим є вказаний найбільш агресивний шар.

Г). Вплив відносної відстані труби від осевої вертикальної поздовжньої площини топки ( $R_i / R$ ) характеризує графік  $I_g (R_i / R)$  (рис. 8).

З аналізу цієї залежності випливає, що її можна апроксимувати рівнянням виду

$$I_g = d e^{-m(R_i / R_o)^n}.$$

$I_g$  – інтенсивність ЗЕ, мм/рік;

$d, m, n$  – величини, що залежать від умов функціонування ПК із КШ.

ЗЕ найінтенсивніша в середній, приосевій частині об'єму КШ. При віддаленні від неї  $I_g$  знижується у кілька разів. На графіках рис. 8 видно вплив відносної висоти розташування труби.

Практично найбільш сильно ЗЕ впливає на середню частину пучка занурених в КШ труб шириною 20–25% ширини топкової камери. При цьому, чим інтенсивнішою є ЗЕ, тим більша різниця рівня  $I_g$  у середній частині та у країв топки (рис. 8). Ця частина пучка визначає його  $R_c$ , тобто  $R_c$  всього ПК.

При вичерпанні  $R_c$  труб середньої частини труби пристінних частин свій  $R_c$  ще не вичерпа-

ють. Якщо вести відновлювальний ремонт пучка вибірково, то оновити (замінити новими) слід було б труби тільки середньої частини. Якщо ж вести ремонт пучка в цілому, то замінити слід було б усі його труби.

Важливо відмітити і ту обставину, що у найбільш вразливій середній частині пучка у труб, розташованих на різних відмітках,  $R_c$  – неоднаковий. Мінімальним  $R_c$  мають труби, розташовані в зоні максимального  $I_g$ ; на рис. 8. – це труби на  $H = 370$  мм. Труби ж середньої частини пучка на відмітці  $H = 130$  мм мають ще  $R_c$  практично такий самий, як  $R_c$  пристінних труб на позначці  $H = 370$  мм.

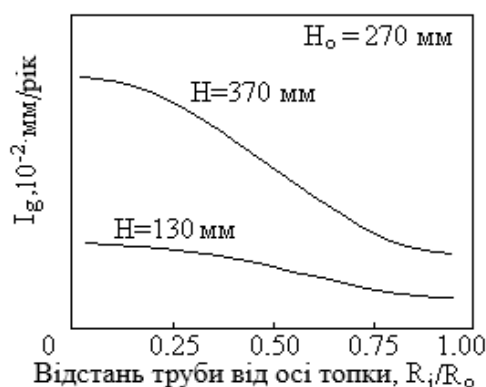


Рис. 8. Характер впливу відстані труби від осі топки на інтенсивність ЗЕ

При проектуванні пучка та при проведенні відновлювального ремонту необхідно враховувати і цю обставину. Використовуючи можливості застосування труб із матеріалів з різною ерозійною стійкістю, а при відновленні – проведення вибіркового ремонту, можна досягти зниження витрат на технічне обслуговування ПК з КШ.

**Висновки.** ПК низькотемпературного КШ мають набір властивостей, що формують істотну перевагу їх перед ПК традиційних типів.

Проаналізовано характерні приклади зміни траєкторій ресурсу елементів ПК у часі та надано рекомендації щодо їх вибору в умовах реальної експлуатації ПК.

Проаналізовано вплив основних конструктивних та режимних факторів на інтенсивність процесу зовнішньої ерозії у ПК із КШ.

Зі зменшенням розміру частинок інерту ВЕ посилюється з прискоренням.

Управління ресурсом ПК через управління розміром частинок інерту є на практиці складним науково-технічним завданням, оскільки поточний розмір частинок визначається впливом низки чинників.

Збільшення швидкості псевдозрідження підвищує інтенсивність процесу ЗЕ, причому тим більше, чим дрібніші частинки інерту.

Реальну можливість управління швидкістю псевдозрідження в деякому діапазоні її значень відкриває застосування двоступінчастого горіння в топці з бульбашковим КС.

У поверхнево-охолоджуваних топках збільшення теплової потужності надшарового об'єму зумовлює підвищення температури середовища.

У об'ємно-охолоджуваних топках збільшення теплової потужності надшарового об'єму практично не обумовлює підвищення в ньому температури середовища.

В об'ємі КШ є горизонтальний шар, який містить зону максимальної інтенсивності зовнішньої ерозії.

ВЕ найінтенсивніша в середній, приосевій частині об'єму КШ. При віддаленні її вона знижується.

#### Список літератури:

1. Воїнов О.П., Елькін Ю.Г. Перспективні напрямки розвитку котельно-топкових технологій. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 36 (75), 2025, 3. Ч. 1. С. 131–140. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/17> (дата звернення: 29.12.2025).
2. Елькін Ю.Г., Воїнов О.П. Проблематика розвитку промислових котельно-топкових систем / Матер. міжнар. мультидисциплін. наук. Інтернет-конф. «Світ наукових досліджень. Випуск 19», Тернопіль – Переворськ, Польща 23–24 трав. 2023р. Тернопіль : ФОП Шпак В.Б. С. 242–243.
3. Воїнов О.П., Елькін Ю.Г. Про місце котельних установок у забезпеченні сталого розвитку / Тези допов. 79-ї наук.-техн. конф. проф.-виклад. складу ОДАБА, Одеса, 18–19 трав. 2023р. Одеса : ОДАБА, 2023. С. 173.
4. Елькін Ю., Воїнов О. Про проблеми сучасної енергетики та шляхи їх вирішення / Тези допов. III-ї міжнар. наук.-практ. конф. «Екологія. Ресурси. Енергія», Київ, 23–25 лист. 2022р. Київ : КНУБА, 2022. С. 69–70.
5. Воїнов О.П., Елькін Ю.Г. Про сучасні задачі удосконалення теплоенергетичного устаткування / Тези допов. XIX міжнар. наук.-техн. конф. «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», 21–22 груд. 2023р. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. С. 72–73.

6. Корчевой Ю.П., Півняк Г.Г. Новітні технології використання вугілля в енергетиці. *Наука та інновації*, 2006. Т.2, № 2. С. 53–62.
7. Степанов Д.В., Корженко Є.С., Боднар Л.А. Котельні установки промислових підприємств. Вінниця, ВНТУ, 2011. 120с.
8. Воїнова С.О. Особливості формування ресурса технічних об'єктів / *Енергетика та електрифікація*, 2012, № 10. С. 40–43.
9. Воїнова С.О. Про особливості управління процесом формування та витрачання ресурса технічними об'єктами. *Енергетика та електрифікація*, 2014. № 9. С. 56–60.
10. Voinov O., Elkin Yu. Partial Renewal is a Tool for an Increase in the Environmental Efficiency of the Worn-out Power Facilities. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*. 2021. no. 4(8). pp. 47–51. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.04.07>.
11. Воїнов О.П., Богаченко Д.І., Шевчук Є.О., Черніков М.С. Завдання обмеження зовнішньої ерозії в проблемі освоєння котлів з киплячим шаром/ Зб. допов. конф. «Управління енерговикористанням», Київ, 2002. К.: Альянс за збереження енергії, 2002. С. 551–554.
12. Воїнов О.П., Чернявський О.Є. Зовнішня ерозія в котлах з циркулюючим киплячим шаром. Вивчення процесу / Зб. матер. 5-ї міжнар. наук. – практ. конф. «Управління ефективним енерговикористанням», Одеса, 4–5 верес. 2003р. Одеса, 2003. С. 85–87.
13. Воїнов О.П. Захист котельних топкових екранів від зовнішньої ерозії в киплячому шарі / Н. – т. збірник «Енергозберігаючі технології в муніципальній і промисловій теплоенергетиці – 2006». Одеса : ОНПУ, 2006. С. 31–35.
14. Воїнов О.П., Воїнова С.О. Управління довговічністю котлів з киплячим шаром введенням ерозійно-пасивного інерта/ Матер. наук. – техн. конф. «Нові і нетрадиційні технології в ресурсо– та енергозбереженні», 28–29 верес. 2006р. Одеса – Київ : АТМ України, 2006. С. 13–17.
15. Воїнов О.П., Воїнова С.О. Управління ерозійною агресивністю інерта в котлах з киплячим шаром / Наук. – техн. збірник «Енергозберігаючі технології в муніципальній і промисловій теплоенергетиці – 2006». Одеса : ОНПУ, 2006. С. 28–31.

#### **Voinov O.P., Elkin Yu.H. ABOUT INFLUENCE OF EXTERNAL EROSION PROCESS ON RESOURCE OF FLUIDIZED BED STEAM BOILERS**

*The purpose of article is to analyze the influence of the external erosion process in fluidized bed steam boilers on their resource. Low-temperature fluidized bed steam boilers have a number of properties that form their significant advantages over traditional types of steam boilers. The article analyzes typical examples of changes in the service life trajectories of steam boiler elements over time and provides recommendations for their selection in real steam boiler operation conditions. The influence of the main design and operating factors on the intensity of the external erosion process in fluidized bed steam boilers, as well as the influence of the external erosion process on the service life of boilers, was studied. As a result of the study, it was found that with a decrease in the size of inert particles, external erosion increases with acceleration. Managing the service life of a steam boiler through controlling the size of inert particles is in practice a complex scientific and technical task, since the current particle size is determined by the influence of a number of factors. An increase in the fluidization rate increases the intensity of the external erosion process, and the more so the smaller the inert particles are. The real possibility of controlling the fluidization rate is opened by the use of two-stage frequent combustion in a fluidized bed furnace. In surface-cooled furnaces, an increase in the thermal power of the superlayer volume causes an increase in the temperature of the furnace medium in it; in volume-cooled furnaces, it practically does not cause a similar increase in temperature. In the volume of the fluidized bed there is a horizontal layer, which contains a zone of maximum intensity of external erosion. External erosion is most intense in the middle, axial part of the volume of the fluidized bed. It decreases with distance from it. The conducted research allowed us to establish the characteristics of the operating mode of a fluidized bed steam boiler, depending on its conditions, which, in practical application, will allow us to propose ways and means of increasing the technological efficiency of fluidized bed boilers and increasing their resource, including a significant increase in the resistance of heating surfaces to the effects of external erosion.*

**Keywords:** steam boiler, resource management, fluidized bed, fluidization, external erosion, inert particle.

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 620.61.052

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/25>

**Волянська Я.Б.**

<https://orcid.org/0000-0002-3010-1684>

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Волянський С.М.**

<https://orcid.org/0000-0001-7922-0441>

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Волянський Ю.С.**

<https://orcid.org/0000-0003-4929-564X>

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Яценко В.С.**

<https://orcid.org/0009-0006-8498-7413>

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Мицик А.І.**

<https://orcid.org/0009-0005-5888-873X>

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ СЕЗОННИХ ТА ДОБОВИХ КОЛИВАНЬ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ ТА НАВАНТАЖЕННЯ

У статті здійснено аналіз кліматичних і технічних параметрів, які необхідно враховувати при оцінці ефективного функціонування сонячних електростанцій, підключених до розподільчих мереж 0,4–10 кВ і таких, що працюють за «зеленим» тарифом. Вони зменшують перетоки по мережах, знижують залежність споживачів від магістральних ліній і підвищують живучість електропостачання на локальному рівні. Розглянуто режим роботи СЕС, коли встановлена потужність PV-поля суттєво перевищує допустиму потужність, яку інвертор і мережа можуть передавати в точку загального приєднання (АС-ліміт). Показано, що у такому разі частина потенційного виробітку систематично «зрізається», що погіршує економіку проєкту, але водночас перерозмірене PV-поле дозволяє довше працювати на рівні ліміту, компенсуючи деградацію модулів та забруднення панелей. Додатковим чинником є наявність власного споживання у вузлі приєднання, яке частково «відбирає» генерацію, знижуючи обсяг відпуску в мережу, але підвищуючи ступінь використання встановленої потужності. Обґрунтовано ефект «розширеної полиці». Розроблено методику оцінки ефективності роботи сонячних електростанцій, які працюють за «зеленим» тарифом у розподільній мережі. Вона дозволяє за однакових кліматичних і конструктивних умов, але за наявності обмежень за активною потужністю на стороні змінного струму та різної структури власного споживання, визначити архітектурні вузькі місця та сформулювати рекомендації щодо використання накопичувачів енергії й алгоритмів управління. Це сприятиме підвищенню ефективності використання встановленої потужності та зменшенню втрат, пов'язаних із обмеженнями. Методика враховує міжнародно прийняті стандарти з розрахунків ефективності функціонування фотоелектричних установок. На основі реальних даних роботи СЕС виконано порівняльний аналіз вироблення станціями електроенергії, коефіцієнта використання встановленої потужності, питомої генерації та впливу структури власного споживання на енергетичні показники станцій. Намічено напрями подальших досліджень.

**Ключові слова:** генерація, енерговіддача, енергоефективність, сонячна електростанція, фотоелектричне поле.



**Постановка проблеми.** В умовах трансформації енергосистеми України, обумовленої як загальноєвропейським курсом на декарбонізацію, так і військовими руйнуваннями централізованої інфраструктури, особливого значення набуває розвиток децентралізованої генерації. Розподілені джерела електроенергії на базі відновлюваних джерел дозволяють підвищити живучість енергосистеми, знизити залежність від магістральних мереж та централізованих генеруючих потужностей, а також забезпечити стійке електропостачання споживачів на рівні розподільчих мереж 0,4–10 кВ.

Приватні сонячні електростанції (СЕС) малої та середньої потужності, інтегровані в розподільні мережі населених пунктів, фактично виконують роль локальних джерел покриття денних навантажень, зменшуючи перетікання по мережах та підвищуючи резервування електропостачання. При цьому питання узгодження режимів їх роботи з обмеженнями мережевої інфраструктури, а також економічної та енергетичної ефективності експлуатації стають критично важливими для подальшого масштабування таких рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В сучасних умовах зростає інтерес до оцінки ефективності функціонування сонячних електростанцій, як комплексного заходу, який включає як технічні параметри, так і економічні показники, що обумовлює значний ступінь актуальності цього питання і характеризується збільшенням наукових публікацій, присвячених дослідженням в цієї галузі. Питаннями ефективності кремнієвих сонячних елементів та пасивного охолодження фотоелектричних модулів займається дослідницька група під керівництвом Мартіна Грина [1, 2, 3]. Дослідженням багатоперехідних сонячних елементів та їх надійності присвячені роботи Сари Курц [4, 5]. Автором фундаментальних робіт з моделювання енергетичного виходу СЕС є Арно Сметс [6, 7]. Роботи [8, 9, 10] присвячено актуальним питанням створення цифрових двійників та їх використанню при моделюванні фотоелектричних установок; розробкам в області експлуатації гібридних систем на основі фотоелектричних батарей для згладжування пікових навантажень.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка методики для оцінки ефективності функціонування сонячних електростанцій, працюючих за «зеленим» тарифом у розподільній мережі, в умовах лімітування за активною потужністю на стороні змінного струму.

Об'єктами дослідження є дві приватні сонячні електростанції, які працюють за «зеленим» тарифом, обидві приєднані до розподільної мережі 0,4 кВ місцевого оператора системи розподілу. Відстань між станціями становить близько 3500 м, що дозволяє вважати їх кліматичні умови (рівень інсоляції, троянда вітрів, температурний режим) практично ідентичними.

Обидві станції розроблені, укомплектовані і змонтовані за типовим проектом та мають однакові основні технічні параметри:

- встановлена DC-потужність: фотоелектричне поле кожної станції сформоване з однакових за типом і кількістю модулів, що забезпечують сумарну встановлену DC-потужність близько 45 кВт;

- допустима потужність за змінним струмом (АС-потужність): кожна СЕС має мережні інвертори із загальною номінальною АС-потужністю 30 кВт, що відповідає договірному АС-ліміту 30 кВт у точці приєднання;

- тип модулів: кремнієві фотоелектричні панелі одного виробника та однієї серії, з однаковою номінальною потужністю окремих модулів та однаковою схемою включення в рядки (*strings*);

- тип інверторів: трифазні мережні інвертори ідентичного типу та конфігурації (однакова кількість MPPT (*maximum power point tracker*)-входів, однакові діапазони напруги DC та номінальна потужність за АС);

- схема підключення до мережі: в обох випадках реалізовано стандартне трифазне підключення через вступно-розподільний пристрій, вузол обліку електроенергії за «зеленим» тарифом та комутаційну апаратуру згідно з типовими технічними умовами оператора системи розподілу.

Кут нахилу фотоелектричних модулів, орієнтація з боків світла, умови монтажу та експлуатації для обох станцій ідентичні. Це дозволяє надалі розглядати їх як типові об'єкти з однаковими конструктивними та кліматичними умовами, а відмінності у режимах роботи та показниках ефективності пов'язувати переважно з особливостями власного споживання електроенергії на майданчику кожної станції.

Основна відмінність між станціями полягає у структурі та величині власних споживачів енергії (навантажень, підключених до тієї ж точки приєднання, що і СЕС). В одному випадку переважає більш виражене власне споживання, в іншому – станція більшу частину часу працює переважно на відпустку енергії в мережу. Це дозволяє в рамках дослідження порівнювати вплив профілю наван-

таження споживачів на фактичне вироблення та використання встановленої потужності при однаковій генераційній частині.

**Виклад основного матеріалу.** Суттєвий стимул розвитку приватних СЕС в Україні надала тарифна політика, орієнтована на підтримку поновлюваної генерації, зокрема механізм «зеленого» тарифу для домогосподарств та малого бізнесу. Можливість продажу надлишкової електроенергії у мережу за фіксованим підвищеним тарифом забезпечила привабливість інвестицій у сонячну генерацію для приватних власників. Подібні установки, розміщені на дахах і прилеглих територіях приватних домоволодінь, формують значний сегмент децентралізованої генерації. Вони не тільки скорочують споживання електричної енергії з традиційних джерел, але й вносять вклад у покриття локальних навантажень у вузлах розподільчої мережі. У сукупності це покращує екологічні показники, сприяє зниженню викидів парникових газів та частково розвантажує мережеву інфраструктуру у періоди денних піків навантаження.

Проте експлуатація приватних СЕС за «зеленим» тарифом багато в чому визначається не лише встановленою потужністю фотоелектричних модулів, а й технічними та договірними обмеженнями з боку операторів системи розподілу. В результаті реальне вироблення та обсяг відпуску енергії в мережу в ряді випадків суттєво відрізняються від теоретично можливих значень, розрахованих за встановленою по постійному струму (DC-потужністю) станції.

Типовим прикладом є ситуація, коли встановлена сумарна потужність фотоелектричних модулів (PV) перевищує максимально допустиму активну потужність, яку інвертор і приєднана мережа можуть передати в точку загального приєднання. У цьому випадку для приватної сонячної

електростанції з DC-потужністю порядку 45 кВт встановлено ліміт змінного струму (АС-ліміт) на рівні 30 кВт, обумовлений як параметрами інверторного обладнання, так і технічними умовами мережевої організації. На рис. 1 наведено добовий профіль потужності при АС-ліміті 30 кВт та оцінку потенційної кривої «без АС-ліміту».

При високих рівнях сонячної радіації та низькому власному споживанні об'єкта частина потенційного вироблення неминуче «зрізається» за рахунок обмеження потужності інвертора, що призводить до недовикористання встановленої потужності фотоелектричного поля. З іншого боку, наявність «перерозміряного» по DC поля панелей (45 кВт при АС-ліміті 30 кВт) має позитивну сторону. При правильно підібраному співвідношенні PV / АС-ліміту збільшується тривалість інтервалу, протягом якого станція здатна віддавати в мережу граничну потужність 30 кВт. При цьому формується розширена «полиця» добової кривої генерації на рівні АС-ліміту (рис. 2). Це призводить до зростання сумарної кількості переданої в мережу енергії порівняно з варіантом, коли встановлена потужність панелей близька до 30 кВт.

Також у реальних умовах профіль генерації, за змінної хмарності та швидких флуктуацій інсоляції, потужність може мати короточасні провали, які змінюють форму добової кривої та впливають на інтегральні показники ефективності (кольорова частина графіку рис. 1). Це створює передумови для технічних рішень, спрямованих на підвищення корисного відпуску енергії, зокрема за рахунок накопичення та перерозподілу енергії в часі. Концептуальний зміст такого зсуву в часі та заповнення «провалів» наведений на рис. 3.

Таким чином, проблема неповного використання встановленої потужності в умовах жорстких АС-лімітів і мережевих обмежень носить подвійний характер: з одного боку, має місце

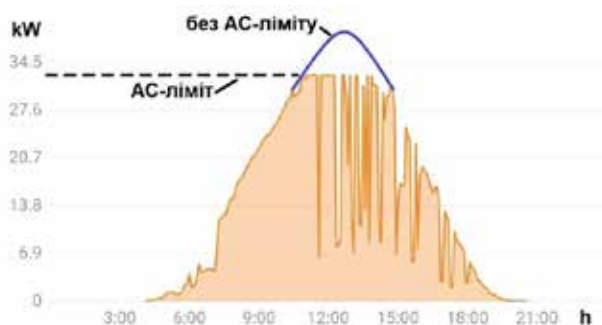


Рис. 1. Добовий профіль активної потужності СЕС при АС-ліміті 30 кВт та оцінка потенційної кривої «без АС-ліміту»



Рис. 2. Добовий профіль генерації у ясний день з характерною «полицею» на рівні АС-ліміту



**Рис. 3. Потенціал використання накопичувача енергії для зсуву генерації в часі:**  
зона 1 – високопотужний інтервал, зона 2 – вечірній інтервал підтримки / компенсації

зріз піків генерації, з іншого – перерозмірене PV-поле дозволяє збільшити інтегральне вироблення за лімітом 30 кВт і підвищити стійкість енерговіддачі до деградації та забруднень. Це вимагає пошук рішень, що дозволяють раціонально комбінувати вибір встановленої потужності PV, параметри інверторів, застосування накопичувачів енергії та алгоритмів керування потоками потужності між СЕС, накопичувачами та мережею у часі.

Аналіз роботи обох станцій виконувався з урахуванням фактичних експлуатаційних даних. Як вихідні дані використовувалися:

- звітні дані щодо генерації та відпуску електроенергії за «зеленим» тарифом за кожен зі станцій (помісячні значення обсягів вироблення та відпуску в мережу; за наявності – добові та / або погодинні дані, отримані з журналів інверторів та / або систем моніторингу, що включають активну потужність, вироблену енергію та стан інверторів);

- експлуатаційні дані щодо роботи обладнання (інформація про простої, аварійні та планові відключення; облік можливих обмежень з боку мережі або автоматики (спрацьовування захисту, обмеження напруги тощо);

- метеорологічні та погодні дані (зведення по сонячній інсоляції (добові та / або місячні значення сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню; температура навколишнього повітря, а за наявності – оцінка температурного режиму панелей (наприклад, залежно «температура модуля – температура повітря – рівень інсоляції»)).

Зазначений набір вихідних даних дозволяє не лише оцінити інтегральні показники вироблення та використання встановленої потужності, але й за необхідності виконувати нормування параметрів за радіаційним та температурним режимами,

а також виділяти періоди з аномальними умовами (сильна хмарність, високі температури, забруднення панелей тощо).

Основними показниками для методики аналізу функціонування сонячних електростанцій та оцінки ефективності використання ними встановленої потужності DC / AC є наступні.

1. Місячне та річне вироблення електроенергії  $E_{\text{міс}}, E_{\text{річ}}$  – обсяг електроенергії, виробленої кожною станцією за відповідний період, кВт·год. Розглядаються як загальна генерація, так і фактична відпустка до мережі за «зеленим» тарифом.

2. Питоме вироблення, кВт·год / кВт встановленої потужності.

Для кожної станції розраховуються питомі показники:

$$e_{DC} = E / P_{DC, \text{вст}}, \quad e_{AC} = E / P_{AC, \text{лім}},$$

де  $E$  – вироблення електроенергії за період;  $P_{DC, \text{вст}}$  – встановлена потужність по постійному струму (45 кВт);  $P_{AC, \text{лім}}$  – договірний AC-ліміт (30 кВт).

Ці показники дозволяють порівнювати ефективність станцій між собою та оцінювати, наскільки повно використовується встановлена потужність у розрахунку на 1 кВт.

3. Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП).

Коефіцієнт використання встановленої потужності для заданого періоду визначається як

$$\text{КВВП} = E / P_{\text{вст}} \cdot T,$$

де  $P_{\text{вст}}$  – встановлена потужність (за DC або за AC-лімітом, залежно від поставленого завдання аналізу),  $T$  – тривалість періоду, год.

КВВП відображає частку часу, умовно еквівалентну роботі станції на номінальній потужності, і служить інтегральним показником ефективності використання встановленої потужності.

4. Performance Ratio (PR).

Показник Performance Ratio характеризує відношення фактичного вироблення станції до теоретично можливого вироблення за заданих умов інсоляції та ідеальної роботи обладнання

$$PR = E_{\text{факт}} / E_{\text{теор}}$$

де  $E_{\text{теор}}$  визначається за даними про сонячну радіацію на площину модулів з урахуванням встановленої потужності, температурних коефіцієнтів та геометрії установки.

Показник Performance Ratio дозволяє оцінити сукупний вплив втрат (оптичних, електричних, температурних, через забруднення панелей, деградацію модулів тощо) та якість функціонування обладнання.

5. Втрати через обмеження АС-ліміту.

Окремо оцінюються втрати генерації, спричинені обмеженням активної потужності інвертора на рівні 30 кВт АС при встановленій потужності PV-поля 45 кВт DC, а саме різниця між потенційним виробленням станції за відсутності обмеження по АС-потужності і фактичним виробленням з урахуванням ліміту, тобто енергія, яка могла б бути вироблена і передана в мережу при іншій архітектурі (наприклад, при більшому АС-ліміті або наявності накопичувача енергії), але була «зрізана» алгоритмом обмеження потужності.

Використовуючи статистичні дані звітних форм, проведено оцінку річного сумарного вироблення (власне споживання + відпуск у мережу) для кожної станції. Відмінності між станціями становлять 0–5 % і пояснюються насамперед відмінностями в структурі та рівні власного споживання: за більш розвиненого локального навантаження менше енергії «втрачається» через АС-ліміт, оскільки частина генерації використовується на місці.

Для встановленої потужності 45 кВт DC і АС-ліміту 30 кВт за річного виробітку порядку 45 МВт·год середній КВВП за АС-лімітом становить приблизно 0,17, що відповідає діапазону 0,16–0,20, характерному для мережевих PV-установок в умовах півдня України. Це під-

тверджує коректність вихідних даних і відсутність грубих аномалій у режимі роботи станцій.

Для типових літніх місяців оцінено питомий виробіток, КВВП та показник Performance Ratio сонячних електростанцій. За даними звітних форм річний встановлено, що виробіток кожної станції, що досліджувались, становить орієнтовно 42,8–46,3 МВт·год, при цьому відмінності між станціями по роках досягають 4–5 % через відмінності в профілі навантаження споживачів.

**Висновки.** Розроблена методика для оцінки ефективності функціонування сонячних електростанцій, працюючих за «зеленим» тарифом у розподільній мережі, дозволяє в умовах лімітування за активною потужністю на стороні змінного струму та в ідентичних кліматичних та конструктивних умовах, але з різною структурою власного споживання, обґрунтовано виділити архітектурні вузькі місця та сформулювати рекомендації щодо застосування накопичувачів енергії та алгоритмів управління для підвищення ефективності використання встановленої потужності та зменшення втрат від обмеження.

Якісний аналіз добових профілів генерації показує ефективність використання встановленої потужності: у ясні весняно-літні дні добова крива потужності має виражену «полицю» на рівні 30 кВт у середині дня; у хмарні дні генерація рідко досягає АС-ліміту, і втрати є незначними.

#### Список літератури:

1. Green M., Zhou Z. Improved silicon solar cells by tuning angular response to solar trajectory. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16 (1). P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55681-1>.
2. Zhou Z., Bahl P., Tkachenko S., Hari A., Silva C., Timchenko V., Green M. Vortex generators for passive cooling of rooftop photovoltaic systems under free convection. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2023. Vol. 13 (5). P. 743–749. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3299752>.
3. Dhinish M., Alrashidi A. Photovoltaic degradation rate affected by different weather conditions: A case study based on PV systems in the UK and Australia. *Electronics*. 2020. Vol. 9. № 4. Article 650. <https://doi.org/10.3390/electronics9040650>.
4. Reagan J., McKuin Brandi., Kurtz S. Comparison of Reflector Materials for a Vertical Bifacial Solar Canal. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2025. Vol. 15. № 2. P. 343–352. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2024.3521089>.
5. Mahmud Z., Kurtz S. Effect of solar panel orientation and EV charging profile on grid design. *Renewable Energy*. 2024. Vol. 231. Article 120923. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120923>.
6. Saïta F., Padmakumar G., Rodriguez P., Moya P., Santbergen R., Smets A. Time-Efficient, Accurate, and Experimentally Grounded Optical Modeling of Multiscale-Textured Thin-Film Solar Cells. *Global Challenges*. 2026. Vol. 10. e00448. <https://doi.org/10.1002/gch2.202500448>.
7. Limodio G., Bartesaghi D., Padmakumar G., Rajagopal D., Shah A., Hamers E., Smets A. Modulated surface texturing of temporary Al foils substrates for high-efficiency thin-film, flexible solar cells. *IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2020. P. 1103–1105. <https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300722>.
8. Angelova D. D., Carmona Fernández D., Calderón Godoy M., Álvarez Moreno J. A., González J. F. A review on digital twins and its application in the modeling of photovoltaic installations. *Energies*. 2024. – Vol. 17. № 5. – Article 1227. <https://doi.org/10.3390/en17051227>.
9. Værbak M., Billanes J. D., Jørgensen B. N., Ma Z. A digital twin framework for simulating distributed energy resources in distribution grids. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 11. Article 2503. <https://doi.org/10.3390/en17112503>.
10. Jo K.-Y., Go S.-I. Operation method of PV–battery hybrid systems for peak shaving and estimation of PV generation. *Electronics*. 2023. Vol. 12. № 7. Article 1608. <https://doi.org/10.3390/electronics12071608>.

**Volianska Ya.B., Volyanskyy S.M., Volianskyi Yu.S., Yashchenko V.S., Mytsyk A.I. EVALUATION OF THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF SOLAR POWER PLANTS CONSIDERING SEASONAL AND DIURNAL VARIATIONS IN SOLAR IRRADIANCE AND LOAD DEMAND**

*The article analyzes the climatic and technical parameters that must be taken into account when evaluating the effective functioning of solar power plants connected to 0.4–10 kV distribution networks and operating at a «green» tariff. They reduce network flows, reduce consumers' dependence on main lines, and increase the survivability of power supply at the local level. The mode of operation of the SPP is considered, when the installed power of the PV field significantly exceeds the permissible power that the inverter and the network can transmit to the common connection point (AC limit). It is shown that in this case, part of the potential output is systematically «cut off», which worsens the project economics, but at the same time the overdimensioned PV field allows you to work longer at the limit level, compensating for the degradation of modules and contamination of panels. An additional factor is the presence of onsite consumption in the connection node, which partially «takes away» generation, reducing the volume of supply to the network, but increasing the degree of use of installed capacity. The «extended shelf» effect is justified. A methodology for evaluating the efficiency of solar power plants operating at a «green» tariff in the distribution network has been developed. It allows you to identify architectural bottlenecks and form recommendations for the use of energy storage devices and control algorithms under the same climatic and structural conditions, but with restrictions on active power on the side of alternating current and different structures of your onsite consumption. This will help to improve the efficiency of using installed capacity and reduce losses associated with restrictions. The methodology takes into account internationally accepted standards for calculating the efficiency of photovoltaic installations. Based on real data from the SPP operation, a comparative analysis of power generation by stations, the Installed Capacity Utilization Rate, specific generation and the influence of the structure of onsite consumption on the energy indicators of stations is performed. Directions for further research are outlined.*

**Keywords:** generation, energy output, energy efficiency, solar power plant, photovoltaic field.

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Дорошенко В.В.**

<https://orcid.org/0009-0000-3509-0809>

Одеський національний технологічний університет

## ОТРИМАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В НАФТОВІЙ СВЕРДЛОВИНІ ПРОВЕДЕННЯМ ЕКЗОТЕРМІЧНОЇ ХІМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ

*Питання отримання теплової енергії, як головного завдання теплоенергетичного комплексу, невіддільно пов'язано з забезпеченням первинними джерелами енергії, серед яких превалююча роль належить нафті.*

*На тлі важливості нафти, як домінуючого джерела отримання теплової енергії, розробка більшості нафтових родовищ перейшла у пізню або стагнуючу стадію при наявності значної кількості залишкових і важковидобувних запасів. Це ускладнюється і тим, що наявна частка невироблених запасів представлена високопарафіністими нафтами в умовах близькості пластової температури і температури насичення нафти парафіном, спричиняючи його кристалізацію і зменшення пропускної здатності порових каналів.*

*Для збільшення видобутку нафти шляхом розплавлення і усунення парафінових відкладів, запропоновано і досліджено процес отримання теплової енергії шляхом використання термохімічного ефекту від екзотермічної реакції гранульованого магнію з солянокислотним розчином.*

*Запропоновано мобільну конструкцію автоклава високого тиску для дослідження і вивчення процесу отримання теплової енергії з використанням екзотермічної хімічної реакції.*

*Представлено результати досліджень щодо впливу тиску на кінетику реакції та ефективності отримання теплової енергії в свердловинних умовах.*

*Експериментально підтверджено, що при зростанні тиску швидкість розчинення магнію в солянокислотному розчині знижується через утворення на поверхні гранул водневої газової оболонки, перешкоджаючої процесу дифузії реагентів.*

*Отримано емпіричне рівняння залежності швидкості реакції від тиску та досліджено динаміку зміни температури в зоні реакції.*

*На прикладі Луквинського нафтового родовища показано розрахунок отримання теплової енергії на вибої типової свердловини.*

*Результатами досліджень підтверджено доцільність і перспективність застосування термохімічних реакцій для ініціювання теплової енергії в свердловинних умовах.*

*Представлені результати досліджень є підставою для подальшого вивчення і розробки технологічних процесів в напрямку використання теплової енергії щодо повноти вилучення вуглеводнів з надр і забезпечення теплоенергетики надійним джерелом первинної енергії.*

**Ключові слова:** *теплова енергія, екзотермічна хімічна реакція, гранульований магній, соляна кислота, тиск, температура.*

**Постановка проблеми.** Сучасний стан паливно-енергетичного комплексу України характеризується виснаженням ресурсів традиційних родовищ та переходом більшості з них у пізню стадію розробки. Однією з ключових проблем цієї стадії є значне падіння пластової температури та зміна термодинамічного стану покладу. Це призводить до інтенсивного формування асфальто-смолистих та парафінових відкладів у пористому середовищі та стовбурі свердловин, що критично знижує їхню продуктивність.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Отримання теплової енергії є головним завданням теплоенергетики, як галузі, яка об'єднує енергетичні ресурси та енергоносії, виробництво, перетворення, передачу і використання різних форм енергії.

На даний час у вироблені теплової енергії більш як 85% складають нафта, газ, вугілля і уран, причому найпоширенішим енергоносієм залишається нафта, частка якої в структурі світових первинних джерел енергопостачання складає біля третини [1, 2, 3].





В цьому аспекті важливим залишається питання забезпечення паливно-енергетичного комплексу вуглеводнями [4], однак, більшість працюючих родовищ Європи і України перейшли у пізню стадію розробки, яка характеризується монотонним зниженням видобутку нафти [5, 6, 7].

Для пізньої стадії розробки характерно і те, що на тлі зменшення видобутку, в покладах залишаються суттєві залишкові запаси нафти, які зосереджуються у невидобутих ділянках пласта і відносяться до категорії важковидобувних [8, 9, 10].

Ускладнюючим чинником розробки таких родовищ є утворення і нагромадження в поровому просторі, перфораційних отворах і у стовбурі свердловин парафінових відкладів, які провокують зменшення очікуваного видобутку нафти.

Ця проблема, головним чином, спричинена порушенням термодинамічного стану покладу внаслідок прояву ефекта Джоуля-Томсона при русі нафтогазової суміші та проведення у свердловинах ремонтно-відновлюваних робіт з нагнітанням в них «холодних» рідин з поверхні [11, 12] і вимагає теплової дії на «забруднені» ділянки.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є обґрунтування та дослідження процесу генерування теплової енергії безпосередньо у вибої нафтової свердловини за рахунок екзотермічної реакції взаємодії гранульованого магнію з солянокислотним розчином для інтенсифікації видобутку нафти на пізній стадії розробки родовищ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- експериментально встановити вплив гідростатичного тиску на кінетику реакції розчинення магнію та динаміку зміни температури в зоні реакції;
- визначити математичну залежність швидкості реакції від зовнішнього тиску та часу для прогнозування тривалості теплового впливу;
- виконати практичний розрахунок необхідної кількості реагентів та очікуваного температурного ефекту на прикладі типової свердловини Луквинського нафтового родовища для підтвердження технологічної ефективності методу.

**Виклад основного матеріалу.** Одним з напрямків збільшення повноти вилучення важковидобувних залишкових запасів нафти є застосування теплоенергетичних технологій, заснованих на принципах хімічної термодинаміки, як фундаментальної основи управління енергетичними процесами в теплоенергетиці.

Реалізація цього напрямку досягається проведенням термохімічних обробок свердловин з отриманням тепла за рахунок екзотермічної

хімічної реакції [13, 14]. В основу обробок покладено реакцію гранульованого магнію з соляною кислотою:



В результаті реакції виділяється 4520 ккал тепла на 1 кг магнію. Фізична густина магнію – 1740 кг/м<sup>3</sup>, насипна – 880 кг/м<sup>3</sup> при діаметрі гранул – 0.5...1.25 мм. Водень завжди виділяється у газоподібному стані і навіть при пластових тисках і температурах розчинність його у воді (відпрацьований розчин кислоти) досить низька – 18 мл/л.

Виробництво гранульованого магнію фракції 0,5...1,0 мм, який є базовим реагентом при термохімічних обробках, розпочато в Україні [15], а пізніше в Китаї були введені в експлуатацію дві промислові установки з виробництва гранульованого магнію за українською технологією [16].

Технологічно термохімічна обробка полягає у створенні у стовбурі свердловини в інтервалі перфорації вогнища реакції гранульованого магнію з 15% солянокислотним розчином.

Технологія може реалізуватися за двома схемами (рис. 1). За схемою **A** інтервал перфорації у стовбурі свердловини заповнюється гранулами магнію з наступною доставкою до нього солянокислотного розчину. За схемою **B** навпаки – магній доставляється (намивається) в інтервал перфорації, попередньо заповнений солянокислотним розчином. Після завершення реакції відпрацьований солянокислотний розчин відтискається в пласт для передачі теплової енергії для розплавлення парафінових відкладів і деблокування порових каналів.

Взаємодію магнію з соляною кислотою при термохімічних обробках свердловин висвітлено в роботах [17, 18, 19], однак в них не враховано особливості перебігу реакції в умовах тисків, близьких до свердловинних.

В нормальних умовах гранульований магній реагує з соляною кислотою інтенсивно з бурхливим виділенням водню, що сприяє перемішуванню ним розчину, вирівнюванню його концентрації та прискоренню інтенсивності реакції. При збільшенні тиску в системі, зменшується об'єм водню і погіршується відведення продуктів реакції від поверхні гранул у розчин. Реакція з кінетичної переходить у дифузійну фазу [20, 21, 22].

Для дослідження кінетики реакції гранульованого магнію з соляно-кислотним розчином при високих тисках нами змонтовано мобільний автоклав, головною складовою якого є термоізолюваний контейнер високого тиску 1, який заповнюється гасом до заданого тиску (рис. 2).



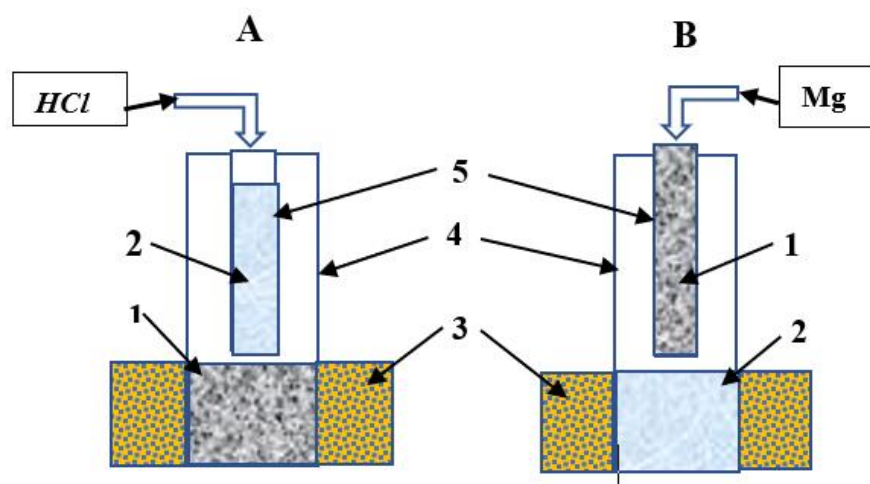


Рис. 1. Принципові схеми локалізації теплової енергії на вибої свердловини

1 – гранули магнію; 2 – солянокислотний розчин; 3 – продуктивний пласт; 4 – стовбур свердловини (експлуатаційна колона); 5 – насосно-компресорні труби

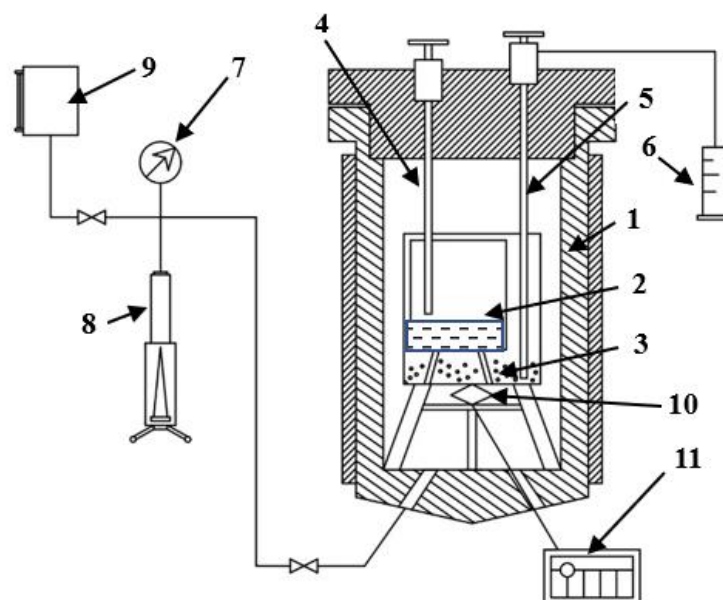


Рис. 2. Автоклав для дослідження кінетики хімічних реакцій при тисках до 40 МПа і температурах до 150 °С

В середині автоклава розташований скляний стаканчик 2 з кислотою, дно якого руйнується латунним стрижнем 4 для ініціювання початку реакції та фарфорова ємність 3 з реагентним матеріалом (гранульований магній). Забір проб кислоти, не зупиняючи плину реакції під тиском, здійснюється за допомогою хімічно-пасивної трубки 5 у мензурку 6. Підтримання заданого тиску в процесі відбору проб відпрацьованого кислотного розчину, відповідно до показів зразкового манометра 7, забезпечується ручним гідравлічним пресом 8 з ємності з гасом 9. Визначення температури в зоні екзотермічної реакції виконується за допомогою термодатчика 10 з передачею

інформації на реєструючий прилад 11. Концентрація кислоти у вихідному розчині та пробах, що відбираються, визначається титриметричним методом.

При виконанні досліджень використовувалася постійна надлишкова кількість кислоти (0.22 г-екв або 53.47 г) та постійна кількість магнію ( $G_2 = 1.3 \cdot g$ ).

Розрахунок кількості магнію, що прореагував ( $G_1$ ) визначається за рівнянням:

$$G_1 = 12,15 V_1 (N_0 - N_k), \quad (2)$$

де  $N_0$ ,  $N_k$  – початкова та поточна концентрації кислоти, г-екв/л;  $V_1$  – об'єм кислоти, л. Почат-

кова концентрація кислоти ( $N_0$ ) в дослідях відповідала 15 %.

На рис. 3, за отриманими експериментальними даними, представлено криві залежності кількості розчиненого магнію ( $G_1 \cdot 10^{-3}$  кг) у 15% солянокислотному розчині при тисках 10, 20 і 30 МПа, що відповідає діапазону величин гідростатичного тиску в свердловині в зоні реакції (рис. 1).

На рис. 4 представлено результати досліджень зміни температури в зоні реакції при тиску 10 МПа, в межах якого працює більшість нафтових родовищ України, що перебувають в пізній стадії розробки [7, 12].

Експериментальними дослідженнями підтверджено, що швидкість реакції, як і інтенсивність отримання теплового ефекту суттєво сповільнюються зі збільшенням тиску в зоні реакції (рис. 3, 4). Так, при тиску 10 МПа температура досягає близько 130 °С протягом перших 130...150 с, а потім монотонно знижується, що викликано,

головним чином, зменшенням площі поверхні контактуючих фаз та концентрації кислотного розчину.

Математична інтерпретація результатів експерименту [26, 27] для тисків в системі від 0 до 30 МПа достатньо добре описується емпіричним рівнянням:

$$G_1 = G_2 \left[ 1 - \exp \left( 0.41 e^{-0.693 P^{0.531}} \tau^{0.39 - 0.002 P} \right) \right], \quad (3)$$

де  $P$  – тиск в зоні реакції, МПа,  $\tau$  – час з початку реакції, год.

За рівнянням (4) визначається і час розчинення гранульованого магнію у 15% солянокислотному розчині при тисках в системі до 30 МПа:

$$\tau = \left[ \frac{\ln \left( 1 - \frac{G_1}{G_2} \right)}{-0.41 \exp \left( -0.63 P^{0.531} \right)} \right]^{1/0.39 - 0.002 P} \quad (4)$$

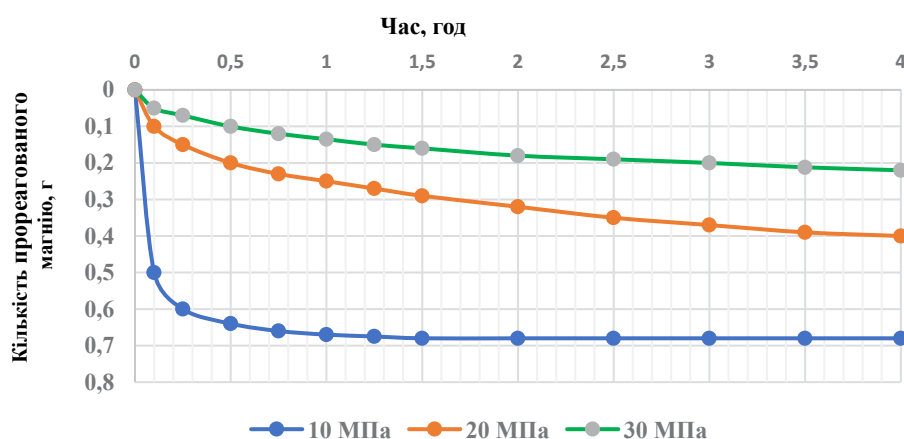


Рис. 3. Кінетичні криві розчинення гранульованого магнію у 15% солянокислотному розчині при тисках 10, 20 і 30 МПа

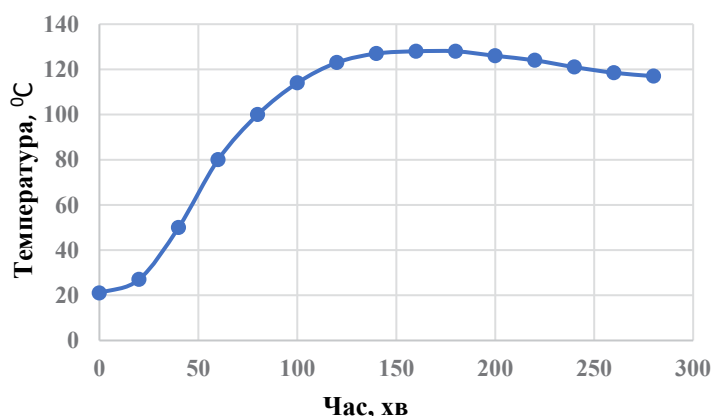


Рис. 4. Динаміка зміни температури в зоні реакції при тиску 10 МПа

Взаємодія магнію з соляною кислотою відноситься до гетерогенних реакцій і активно відбувається у тому випадку, коли має місце безперервна молекулярна або конвективна дифузія реагуючих речовин до поверхні гранул та безперервна зворотня дифузія продуктів реакції. Швидкість процесу дифузії прямо-пропорційна градієнту речовини, а швидкість розчинення магнію – квадрату концентрації кислоти на поверхні гранул [25]. Взаємозв'язок цих двох процесів і обумовлює зміну швидкості реакції з часом. Так, при тиску 10 МПа біля 60% маси магнію розчиняється в солянокислотному розчині за 1 год (рис. 3). Ймовірно це викликано більш активною дією водню на перемішування розчину. Зі збільшенням тиску зменшуються розміри бульбашок водню і ускладнюється їх відрив від поверхні гранул магнію. Така газова оболонка перешкоджає активному контакту магнію з кислотою, зменшуючи площу поверхні гранул, на якій відбувається реакція і, тим самим, збільшуючи час розчинення магнію.

З огляду на реальний об'єкт, наприклад Луквинське нафтове родовище [12, 28], де температура кристалізації парафіну (35 °С) близька до пластової (38 °С) при температурі його плавлення 55 °С, необхідно у фільтровій, найбільш забрудненій частині стовбура свердловини, отримати кількість теплової енергії, достатньої для розплавлення парафінових відкладів.

В першому наближенні, необхідна кількість тепла для розплавлення нафтового парафіну визначається за калориметричним рівнянням:

$$Q = (T_k - T_n) \cdot (\varepsilon_{HCl} \cdot V_{HCl} + \varepsilon_k \cdot V_k), \quad (5)$$

де  $T_k$  – температура в зоні реакції, °С;  $T_n$  – температура пласта, °С;  $\varepsilon_{HCl}$  – питома теплоємність солянокислотного розчину, ккал/кг °С;  $\varepsilon_k$  – питома теплоємність труб експлуатаційної колони, ккал/кг °С;  $V_{HCl}$  – об'єм солянокислотного розчину, м³;  $V_k$  – об'єм металу труби в межах інтервалу перфорації, м³.

З наступного рівняння можна отримати температуру, яку необхідно досягти для розплавлення парафінових відкладів шляхом проведення екзотермічної реакції магнію з соляною кислотою:

$$\Delta T = \frac{Q \cdot m_{Mg}}{m_{HCl} \cdot \varepsilon_{HCl} + m_k \cdot \varepsilon_k}, \quad (6)$$

де  $m_{Mg}$  та  $m_{HCl}$  – маса магнію та кислоти відповідно.

Для реалізації процесу, приміром по схемі А (рис. 1), для типової свердловини Луквинського родовища з діаметром експлуатаційної колони 0,168 м і довжиною фільтра (інтервал перфорації) 10 м, знадобиться 86 кг гранульованого магнію (насипна густина 880 кг/м³) і 3,5 м³ 15% солянокислотного розчину, а температура, що буде досягнута в процесі екзотермічної реакції магнію з соляною кислотою за рівнянням (6) буде сягати 163,8 °С.

Представлені результати щодо отримання теплової енергії на вибої свердловини свідчать про можливість досягнення температури суттєво вищої за температуру плавлення парафіну.

Таким чином, застосування принципів теплоенергетики в частині отримання тепла за рахунок проведення екзотермічної реакції дає можливість звільнити прифільтрову зону від парафінових відкладів та збільшити продуктивність свердловини по нафті.

**Висновки.** Доведено ефективність застосування екзотермічної хімічної реакції як методу отримання теплової енергії на вибої нафтових свердловин.

Показано, що реакція гранульованого магнію із соляною кислотою дозволяє створити локальний осередок теплової енергії на вибої свердловини, що спрямовано на очищення її фільтрової частини від парафінових відкладів, збільшення дебіту і повноти вилучення залишкових важковидобувних запасів нафти.

Запропоновано принципову конструкцію мобільного автоклава високого тиску для оперативного вивчення кінетики екзотермічних реакцій в умовах, наближених до реальних свердловинних.

Експериментально підтверджено вплив тиску на швидкість гетерогенних реакцій, що супроводжуються виділення газоподібної фази.

Отримано емпіричне рівняння кінетики розчинення магнію в солянокислотному розчині в координатах «тиск-час реакції».

Показано процедуру отримання теплової енергії на прикладі типової свердловини Луквинського нафтового родовища.

## Список літератури:

1. Кириленко О. В. та ін. Енергетика України: імовірні сценарії відновлення та розвитку. *Вісник НАН України*, 2022. № 9. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2022.09.022>
2. Басок Б. І., Базєєв Ю. Т. Енергетика, наука і інженерія сьогодення: стан та виклики розвитку. *Теплофізика та теплоенергетика*, 2023. № 45(1). DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.01>
3. Zimmermann, J. Ohne fossile Energien geht es nicht. *Brennstoffspiegel und Mineralölrundschau*, 2009. № 10.
4. Амоша О. І., Гарковенко Г. Л. Світовий паливно-енергетичний комплекс: сучасний стан та тенденції розвитку. *Економіка промисловості*, 2006. № 4.
5. Дорошенко В. М., Тітлов О. С., Купер І. М., Дорошенко В. В. Особливості пізньої стадії розробки нафтових родовищ України та шляхи збільшення видобутку нафти. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 2024. № 2.
6. Дорошенко В. В., Тітлов О. С. Розгляд принципів стабілізації та збільшення видобутку нафти на пізній стадії розробки родовищ на прикладі родовищ України. *Технологічний аудит та резерви виробництва*, 2021. № 2/1(58).
7. Тітлов О. С., Дорошенко В. В. Парадигма пізньої стадії розробки нафтових родовищ. Збірник праць XXIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», Одеса, 2024.
8. Орловський В. М., Білецький В. С., Сіренко В. І. Нафтогазовилучення з важкодоступних і виснажених пластів, Львів, 2023.
9. Витвицький Я. С., Пілка М. С. Аналіз ресурсного потенціалу та економічних проблем нафтовидобування в Україні із родовищ, запаси яких відносяться до категорії важковидобувних. *Науковий вісник ІФНТУНГ. Серія: Економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості*, 2016. № 1(13). DOI: [https://doi.org/10.31471/2409-0948-2016-1\(13\)-10-14](https://doi.org/10.31471/2409-0948-2016-1(13)-10-14)
10. Бойко В. С., Кондрат Р. М., Яремійчук Р. С. (ред.). Довідник з нафтогазової справи. Львів – Івано-Франківськ : Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу, 1996.
11. Дорошенко В. В. Особливості термодинамічних змін в нафтогазонасиченому пористому середовищі. Зб. праць XXIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», Одеса, 2024.
12. Світлицький В. М., Іванків О. О., Ягодовський С. І., Тітлов О. С. Термодинамічний вплив на привибійну зону продуктивних пластів. Одеса, 2024.
13. Бойко В. С. Технологія видобування нафти : підручник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. 827 с.
14. Акульшин О. І. та ін. Технологія видобування, зберігання і транспортування нафти і газу Івано-Франківськ, 2003.
15. Бараннік І. А., Савенець Ю. І. Українському гранульованому магнію – п'ятдесят років. *Металознавство та литво України*, 2021. № 29 (4). С. 58–63.
16. Bol'shakov V. I., Shevchenko A. F., Aleksandrov V. A. et al. Creation and industrial application of modern hardware and technological complexes for iron desulfurization at metallurgical plants in China. *Iron and Steel Industry and Metal Mining Industry*, 2004, № 4.
17. Тарко Я. Б. Деякі хіміко-технологічні аспекти проведення термокислотних оброблень продуктивних пластів. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2004. № 11. С. 61–67.
18. Пустоголов В. І., Орфанова М. М., Орфанова М. М. Дослідження фізичних процесів теплової дії на привибійну зону нафтового пласта. *Нафтогазова енергетика*. 2010. № 1 (12). С. 15–20.
19. Качмар Ю. Д., Світлицький В. М., Синюк Б. Б., Яремійчук Р. С. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину. Львів : Центр Європи, 2004. Кн. 2. 352 с.
20. Романова Н. В. Загальна та неорганічна хімія : підручник. Київ : Ірпінь: ВТФ «Перун», 2002. 480 с.
21. Левандовський І. А., Примиська С. О. Кінетика і термодинаміка в хімічних технологіях органічних речовин. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 144 с.
22. Rankin W. J. Chemical Thermodynamics. Technology & Engineering, Science. *Publication Year Taylor & Francis Ltd*. 2019. DOI: 10.1201/9780429323058
23. Савенков Г. Д., Дорошенко В. М., Зарубін Ю. О. Автоклав для проведення досліджень в промислових умовах. *Нафтопромислова справа*. 1975. № 13.
24. Platt, C. Encyclopedia of electronic components (2012). Reilly/Make. ISBN 978-1-4493-3387-4.
25. Moubarak R. et al. A self-calibrating mathematical model for the direct piezoelectric effect of a new MEMS tilt sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2011. № 12(5). Р. 1033–1040. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2163391
26. Дорошенко В. М., Тітлов О. С., Сагала Т. А., Біленко Н. О. Основи наукових досліджень. Одеса : ОНТУ, 2019.
27. Мислик М. А., Зарубін Ю. О. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі. Івано-Франківськ : Таля, 1999. 494 с.
28. Атлас родовищ нафти і газу України : у 6 т. Західний нафтогазоносний регіон / під ред. М. М. Іваницького. Львів : УНГА, 1998. Т. 5.

**Doroshenko V.V. THERMAL ENERGY GENERATION IN AN OIL WELL VIA AN EXOTHERMIC CHEMICAL REACTION**

*The issue of generating thermal energy, as the primary task of the thermal power complex, is inextricably linked to the provision of primary energy sources, among which oil plays a predominant role.*

*Despite the importance of oil as a dominant source of thermal energy, the development of most oil fields has moved into a late or stagnant stage, characterized by a significant amount of residual and hard-to-recover reserves. This situation is further complicated by the fact that a substantial portion of unproduced reserves consists of high-paraffin oils. Under conditions where reservoir temperatures are close to the paraffin saturation temperature, crystallization occurs, leading to a reduction in the flow capacity of pore channels.*

*To enhance oil recovery by melting and removing paraffin deposits, a process for generating thermal energy using the thermochemical effect of an exothermic reaction between granulated magnesium and a hydrochloric acid solution has been proposed and investigated.*

*A mobile high-pressure autoclave design has been developed to research and study the process of thermal energy generation via this exothermic chemical reaction. The study presents research results regarding the influence of pressure on reaction kinetics and the efficiency of heat generation under downhole conditions.*

*It has been experimentally confirmed that as pressure increases, the dissolution rate of magnesium in the hydrochloric acid solution decreases. This occurs due to the formation of a hydrogen gas envelope on the surface of the granules, which hinders the diffusion of reactants. An empirical equation describing the dependence of the reaction rate on pressure was obtained, and the dynamics of temperature changes in the reaction zone were investigated.*

*Using the Lukvynske oil field as an example, the calculation of thermal energy generation at the bottomhole of a typical well is demonstrated. The research results confirm the feasibility and promising nature of using thermochemical reactions to initiate thermal energy under downhole conditions.*

*The presented findings serve as a basis for further study and development of technological processes aimed at utilizing thermal energy to maximize hydrocarbon recovery and ensure a reliable source of primary energy for the thermal power industry.*

**Keywords:** *chemical thermal energy, exothermic reaction, granulated magnesium, hydrochloric acid, pressure, temperature.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 621.039.58  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/27>

**Скалозубов В.І.**

<https://orcid.org/0000-0003-2361-223X>  
Національний університет «Одеська політехніка»

**Кацарський Ю.С.**

<https://orcid.org/0009-0001-9932-2880>  
Національний університет «Одеська політехніка»

**Мазур Є.В.**

<https://orcid.org/0009-0005-0936-4411>  
Національний університет «Одеська політехніка»

**Вербило І.М.**

<https://orcid.org/0009-0006-3369-3896>  
Національний університет «Одеська політехніка»

**Дербеньов Г.С.**

<https://orcid.org/0009-0007-8289-8297>  
Національний університет «Одеська політехніка»

## КВАЛІФІКАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ВИПРОБУВАНЬ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ПРИ ЗБІЛЬШЕННІ ТРИВАЛОСТІ ПАЛИВНИХ КАМПАНІЙ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

*Представлений огляд матеріалів щодо ймовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) ядерної енергетики та перспективи майбутніх напрямків досліджень. Визначено, що ключовим підходом до оцінки рівня безпеки ядерного реактора є ймовірнісна оцінка безпеки, або кількісний аналіз ризиків, що сприяє процесу прийняття рішень з урахуванням небезпек у проектуванні реактора, а також у людському факторі та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, з метою мінімізувати пов'язані з цим можливостей важкої аварії. На підставі проведеного аналізу результатів ІАБ ядерних енергоустановок типу ВВЕР встановлено необхідність розробки альтернативних методів кваліфікації стратегій випробувань систем безпеки в режимах збільшення тривалості паливних кампаній ядерних реакторів. Представлений альтернативний ризико-орієнтований метод кваліфікації випробувань активних і пасивних систем безпеки в режимах збільшення тривалості паливних кампаній. Наголошується, що в екстремальних умовах воєнного часу України необхідне суттєве удосконалення традиційної методології ІАБ відносно зовнішніх екстремальних явищ/подій. Доведена доцільність використання критерію кваліфікації розробленого метода, яким є ймовірність відмови систем управління аваріями для трьох груп вихідних аварійних подій: теча реакторного контуру до гермооб'єму ядерної енергоустановки, міжконтурні течії по парогенератору та вихідні події з герметичним реакторним контуром. Представлені умови забезпечення проектною надійності систем управління аваріями в режимах збільшення тривалості паливних кампаній. Встановлено необхідні модернізації періодичності планових випробувань активних систем безпеки на потужності реактора; відсутність підстав необхідності кваліфікації періодичності планових випробувань пасивних систем безпеки в режимах збільшення тривалості паливних кампаній.*

**Ключові слова:** ядерна енергоустановка, експлуатація, система безпеки, періодичність планових випробувань, ефективність, методика розрахунку.

**Постановка проблеми.** Впровадження стратегій експлуатації ядерних енергоустановок (ЯЕУ) на підвищеній номінальній потужності (ПНП) та/або збільшеній тривалості робочих режимів реакторів (збільшеній тривалості паливних кампаній – ЗТПК) може забезпечити значне підвищення ефективності експлуатації АЕС (збільшення коефіцієнта використання встановленої потужності). Особливо актуальним є впровадження стратегій ПНП та/або ЗТПК у сучасних екстремальних умовах воєнного часу України внаслідок руйнування/окупації значної частини енергогенеруючих об'єктів і безперервних пошкоджень/руйнувань критичної енергетичної інфраструктури. Однак впровадження стратегій ЗТПК визначає необхідність модернізації стратегії планових випробувань систем безпеки (СБ) в період планово-попереджувальних ремонтів (ППР) енергоблоків атомних електростанцій (АЕС). У даний час на українських АЕС з ВВЕР встановлено проектну щорічну періодичність планових випробувань СБ у період ППР енергоблоків. Активні багатоканальні СБ ЯЕУ з ВВЕР (що забезпечують подачу середовища насосами/ компресорами до об'ємів з протитиском) проходять планові випробування також і в робочих режимах реактора на потужності. Пасивні СБ ЯЕУ, що забезпечують подачу середовища природним перепадом тиску (наприклад, запобіжні клапани реактора/парогенератора), проходять планові випробування тільки в період ППР. Тому при переході на стратегію ЗТПК необхідна кваліфікація вимушеної зміни періодичності планових випробувань СБ у період ППР енергоблоків АЕС, що і визначає актуальність цієї роботи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд ймовірнісної оцінки безпеки ядерної енергетики [1] представляє вступ до концепції ймовірнісної оцінки безпеки, оцінку її останніх розробок та перспективи щодо майбутніх напрямків досліджень у цій галузі. Для цього спочатку надається концептуальне розуміння оцінки безпеки, а потім вступ до того, що таке ймовірнісна оцінка безпеки. Ключовим підходом до оцінки рівня безпеки технології ядерного реактора є ймовірнісна оцінка безпеки, яку також називають кількісним аналізом ризиків [2]. Такий аналіз спрямований на вирішення трьох ключових питань [3, 4]: що може статися? – це включає визначення сценарію аварії, що призводять до пошкодження активної зони та викиду джерела (наприклад, втрата теплоносія, розрив труби парогенератора та затемнення станції); наскільки ймовірна аварійна подія? – це

включає кількісну оцінку пов'язаної з нею ймовірності сценарію(ів) аварії; якими є наслідки аварії? – це включає визначення результатів сценарію аварії для навколишнього середовища та форм життя. Це робить ймовірнісну оцінку безпеки інформативним та корисним методом аналізу ризиків. [5].

Формою стохастичного моделювання ризиків, орієнтованого на дані, є ІАБ, і тому його також зазвичай називають ймовірнісною оцінкою ризиків [6]. Його основними цілями є забезпечення розуміння небажаних наслідків (наприклад, пошкодження активної зони або викид джерел в атмосферу) шляхом моделювання таких подій з пов'язаними з ними ймовірностями та наслідками з використанням доступної інформації, зазвичай на основі історії експлуатації реакторів, що нас цікавлять. Цілями ІАБ є [7, 8] (1) визначення та окреслення різних сценаріїв, які можуть призвести до важкої аварії; (2) оцінка очікуваної ймовірності виникнення для кожної відповідної комбінації подій; та (3) оцінка наслідків, пов'язаних з кожною комбінацією подій.

Для досягнення цілей та завдань обсяг аналізу за підходом ІАБ зазвичай поділяється на три окремі рівні, описані в [9].

Ймовірнісний аналіз безпеки (ІАБ) ЯЕУ знайшов велике признание у світовій ядерній енергетиці після ядерної (важкої) аварії на 2-му енергоблоці АЕС ТМІ (США) у 1979 році [10]. Розробка звітів з аналізу безпеки (ЗАБ) експлуатуючої організації АЕС України (НАЕК Енергоатом) і нормативне регулювання ядерної безпеки (Державна інспекція ядерного регулювання України) також базуються на методології ІАБ [11-12].

Основний ймовірнісний показник (критерій) ядерної безпеки ЯЕУ в методології ІАБ – частота пошкодження активної зони (ЧПАЗ), що по суті визначає ймовірність виникнення ядерної (важкої) аварії з пошкодженням ядерного палива [13]. Визначальні параметри ЧПАЗ [13]:

- частота вихідної події аварії (ВПА), 1/рік;
- ймовірність відмови критичних для забезпечення безпеки систем управління аваріями (СУА) для кожної групи ВПА ( $P$ ).

Проведений у роботах [14] аналіз результатів ЗАБ ЯЕУ з ВВЕР дозволяє зробити наступні коментарі:

- показники ймовірності відмови СБ надмірно консервативно завищено, тому що в більшості випадків базуються на статистиці порушень, не критичних для працездатності/надійності СБ;
- значна невизначеність та/або недостатня



обґрунтованість показників імовірності ВПА, які в більшості випадків встановлюються апіорі для «компенсації» завищених значень показників імовірності ВПА.

Один з головних уроків Фукусімської аварії – необхідність враховувати відносно малоімовірні ВПА, які мають катастрофічні екологічні наслідки. На момент аварії всі енергоблоки АЕС Фукусіма відповідали умовам безпеки щодо ЧПАЗ, однак це не запобігло ядерним та радіаційним аваріям.

На основі результатів ІАБ розроблено ризик-орієнтовані методи модернізації стратегій планових випробувань/ремонтів СБ [14, 15], які базуються на принципі ймовірнісної оцінки впливу відносного збільшення  $\Delta$ ЧПАЗ внаслідок скорочення випробування/ремонтів СБ щодо базового значення ЧПАЗ<sub>0</sub>.

Основні недоліки ризик-орієнтованого підходу модернізації стратегії періодичності планових випробувань/ремонтів СБ, що базується на результатах ІАБ, полягають у наступному.

1. Фактично допускається «штучне» зниження безпеки ЯЕУ з метою підвищення ефективності експлуатації, що суперечить вимогам ядерного законодавства України [10, 14].

2. На базові значення ЧПАЗ<sub>0</sub> найбільш впливають відмови із загальної причини та/або помилкові дії персоналу при управлінні аварією [14]. Тому базові значення ЧПАЗ<sub>0</sub> можуть бути «не чутливими» до скорочення частоти випробування/ремонтів СБ.

Таким чином, актуальною є розробка альтернативних ризик-орієнтованих методів кваліфікації стратегій випробувань СБ у режимах ЗТПК ядерних реакторів, що базуються на показниках (критеріях) та умовах кваліфікації забезпечення проектною надійності і не залежать від невизначеності ймовірності ВПА.

#### Постановка завдання

1. Розробити ризик-орієнтований метод кваліфікації періодичності випробувань систем безпеки при збільшеній тривалості паливних кампаній

2. Аналіз встановлених результатів кваліфікації та розробка практичних рекомендацій.

**Виклад основного матеріалу. Апробація методу кваліфікації періодичності випробувань систем безпеки при збільшеній тривалості паливних кампаній.** Критерій кваліфікації періодичності планових випробувань СБ при збільшенні тривалості паливної кампанії – ймовірність відмови СУА щодо забезпечення функцій безпеки  $P$ , що визначається добутками  $\Pi$  ймовірнос-

тей відмов критичних для безпеки активних  $P_{AS}$  і пасивних  $P_{PS}$  СБ:

$$P = \prod_{i=1}^{N_{AS}} P_{ASi}(T/n_{AS}, \lambda_{AS})_i \prod_{i=1}^{N_{PS}} P_{PSi}(T, \lambda_{PS})_i, \quad (1)$$

де  $P_{ASi}$  – ймовірність відмови  $i$ -ї активної СБ;  $P_{PSi}$  – ймовірність відмови  $i$ -ї пасивної СБ;  $T$  – тривалість паливної кампанії в міжремонтний період енергоблоку;  $n_{AS}$  – кількість планових випробувань активних СБ у міжремонтний період енергоблоку;  $\lambda_{ASi}$ ,  $\lambda_{PSi}$  – ймовірнісний показник інтенсивності потоку накопичення «прихованих» відмов [1 – 3] у міжремонтний період  $i$ -ї активної та пасивної СБ. Параметри  $\lambda_{ASi}$ ,  $\lambda_{PSi}$  визначаються за статистикою результатів планових випробувань.

Умова кваліфікації періодичності планових випробувань СБ при ЗТПК – забезпечення збереження надійності СУА при ЗТПК і проектній тривалості паливної кампанії:

$$P_m(T_m) \leq P_D(T_D), \quad (2)$$

де  $P_m$ ,  $P_D$  – ймовірність відмови СУА при ЗТПК  $T_m$  і проектній тривалості паливної кампанії  $T_D$ .

Для спрощення аналізу приймаються лінійні апроксимації ймовірностей накопичення «прихованих» відмов в активних і пасивних СБ у робочих режимах реактора на потужності:

$$P_{AS} \leq \lambda_{AS} T / n_{AS}, \quad (3)$$

$$P_{PS} \leq \lambda_{PS} T. \quad (4)$$

Тоді, враховуючи (3) і (4), умова кваліфікації СУА:

$$\begin{aligned} & \prod_{i=1}^{N_{AS}} (\lambda_{AS} T_m / n_{ASm})_i \prod_{i=1}^{N_{PS}} (\lambda_{PS} T_m)_i \leq \\ & \leq \prod_{i=1}^{N_{AS}} (\lambda_{AS} T_D / n_{ASD})_i \prod_{i=1}^{N_{PS}} (\lambda_{PS} T_D)_i, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $n_{ASm}$ ,  $n_{ASD}$  – кількість випробувань активних СБ на потужності реактора при ЗТПК і проектній тривалості паливної кампанії.

Склад критичних для безпеки активних і пасивних СБ визначається ВПА.

*ВПА «Максимальна проектна аварія (МПА)»* – розрив головного циркуляційного трубопроводу).

Критичні СБ для ВПА МПА [10-12]:

– пасивна СБ гідроємностей системи аварійного охолодження активної зони реактора (ГЕ CAOЗ);

– активна система аварійного охолодження активної зони реактора насосами низького тиску (CAOЗ НТ).

*ВПА «Міжконтурні течії по парогенератору (ПГ)»* – течії/розриви теплообмінних труб ПГ.

Критичні СБ для ВПА «Міжконтурні течі по ПГ» у загальному випадку:

- активна система підживлення та регулювання концентрації бору в реакторному контурі (ТК);
- активна система аварійного охолодження активної зони реактора насосами високого тиску (САОЗ ВТ);
- активна САОЗ НТ;
- активна система аварійного підживлення ПГ електронасосами (АЖЕН);
- пасивна система пароскидальних пристроїв ПГ (ПСП ПГ).

ВПА «Аварійна зупинка з герметичним реакторним контуром» – знеструмлення енергоблоку, заклинювання/відмови головних циркуляційних насосів, зовнішні екстремальні явища та ін.

Критичні СБ для ВПА «Аварійна зупинка з герметичним реакторним контуром» [10]:

- активна АЖЕН;
- пасивна система імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску (ІЗП КТ);
- пасивна ПСП ПГ.

Умова кваліфікації (5) для ВПА МПА:

$$\frac{\lambda_{AS1} \lambda_{PS1}}{n_{ASm}} T_m^2 = \frac{\lambda_{AS1} \lambda_{PS1}}{n_{ASD}} T_D^2, \quad (6)$$

де  $\lambda_{AS1}$ ,  $\lambda_{PS1}$  – інтенсивність потоку «прихованих» відмов САОЗ НТ і ГЕ САОЗ.

З рівняння (6) витікає умова кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань для ВПА МПА щодо кількості випробувань САОЗ НТ у міжремонтний період ЗТПК:

$$n_{ASm} = n_{ASD} \frac{T_m^2}{T_D^2}. \quad (7)$$

Умова кваліфікації (5) для ВПА «Міжконтурні течі по ПГ»:

$$\frac{\lambda_{AS1} \lambda_{AS2} \lambda_{AS3} \lambda_{AS4} \lambda_{PS2}}{n_{ASm}^4} T_m^5 = \frac{\lambda_{AS1} \lambda_{AS2} \lambda_{AS3} \lambda_{AS4} \lambda_{PS2}}{n_{ASD}^4} T_D^5, \quad (8)$$

де  $\lambda_{AS2}$ ,  $\lambda_{AS3}$ ,  $\lambda_{AS4}$ ,  $\lambda_{PS2}$  – інтенсивність потоку «прихованих» відмов СБ ТК, САОЗ ВТ, АЖЕН і ПСП ПГ.

З рівняння (8) витікає умова кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань для ВПА «Міжконтурні течі по ПГ» у міжремонтний період ЗТПК:

$$n_{ASm} = n_{ASD} \left( \frac{T_m}{T_D} \right)^{5/4}. \quad (9)$$

Умова кваліфікації (5) для ВПА «Аварійна зупинка з герметичним реакторним контуром»:

$$\frac{\lambda_{AS4} \lambda_{PS2} \lambda_{PS3}}{n_{ASm}} T_m^3 = \frac{\lambda_{AS4} \lambda_{PS2} \lambda_{PS3}}{n_{ASB}^4} T_D^3, \quad (10)$$

де  $\lambda_{PS3}$  – інтенсивність потоку «прихованих» відмов ІЗП КТ.

З рівняння (10) витікає умова кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань для ВПА «Аварійна зупинка з герметичним реакторним контуром»:

$$n_{ASm} = n_{ASD} \left( \frac{T_m}{T_D} \right)^3. \quad (11)$$

Результати розрахунків за формулами (7), (9) і (11) представлено на рис. 1.

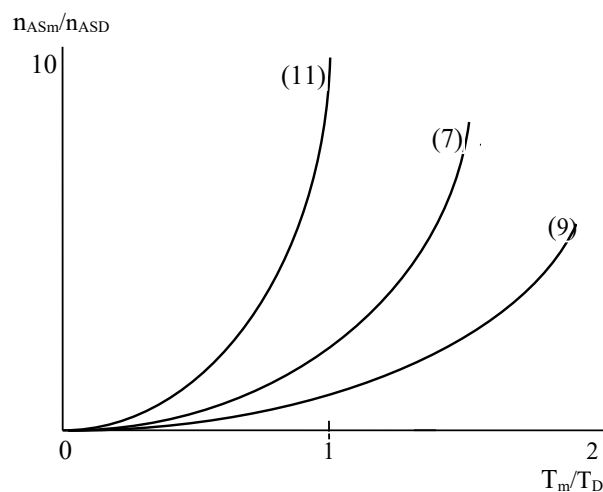


Рис. 1. Результати розрахунків залежності зміни кількості випробувань СБ у ЗТПК відносно проектної кількості випробувань ( $n_{ASm}/n_{ASD}$ ) від зміни підвищеної тривалості паливних кампаній відносно проектної тривалості ( $T_m/T_D$ )

Аналіз розрахунків (рис. 1) доводять до наступних висновків:

– установлені умови кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань у режимах ЗТПК (7), (9) і (11) враховують необхідний перелік проектних ВПА та склад критичних для безпеки СБ ЯЕУ з ВВЕР.

– умови кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань СБ у режимах ЗТПК (2) можуть бути забезпечені модернізацією періодичності планових випробувань тільки активних СБ. Зокрема, при переході на півторарічну паливну кампанію з умов кваліфікації (7), (9) і (11) при регламентованій проектом частоті планових випробувань каналу активної СБ у міжремонтний період енергоблоків (одне випробування на три місяці) впливає середня частота планових

випробувань для кожного каналу: САОЗ НТ, ТК та САОЗ ВТ два випробування на три місяці, АЖЕН щомісячні випробування.

– збільшення частоти (зменшення періодичності) планових випробувань визначає вплив на показники надійності СБ двох протилежних ефектів: з одного боку, зменшення періодичності планових випробувань збільшує ймовірність виявлення «прихованих» відмов – позитивний ефект; з іншого боку, надмірна частота планових випробувань збільшує знос/деградацію та зменшує залишковий ресурс обладнання – негативний ефект. Тому для активних СБ необхідна оптимізація періодичності планових випробувань у режимі ЗТПК.

– відсутні підстави необхідності кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань пасивних СБ (ІЗП КТ, ПСП ПГ), які проходять планові випробування тільки в період ремонтних кампаній енергоблоків, у режимах ЗТПК, тому що домінуючий вплив на загальний показник надійності СУА (1) визначається найменш надійними СБ. Згідно з численними результатами планових випробувань СБ ЯЕУ з ВВЕР показники надійності активних СБ значно менші за показники надійності пасивних СБ ( $\lambda_{AS} \gg \lambda_{PS}$ ). Тому відносно зменшення надійності пасивних СБ внаслідок збільшення міжремонтного періоду режиму ЗТПК компенсується відносним збільшенням надійності активних СБ у загальному показнику надійності СУА (1).

## Висновки

1. На підставі проведеного аналізу результатів імовірнісного аналізу безпеки ядерних енергоустановок із ВВЕР встановлено необхідність розробки альтернативних методів кваліфікації стратегій випробувань систем безпеки в режимах збільшення тривалості паливних кампаній ядерних реакторів.

2. Розроблено альтернативний ризик-орієнтований метод кваліфікації періодичності випробувань активних і пасивних систем безпеки в режимах збільшення тривалості паливних кампаній.

3. Критерій кваліфікації розробленого метода – ймовірність відмови систем управління аваріями для трьох груп вихідних аварійних подій: теча реакторного контуру до гермооб'єму ядерної енергоустановки, міжконтурні течії по парогенератору та вихідні події з герметичним реакторним контуром.

4. Умови кваліфікації розробленого метода – забезпечення проектної надійності систем управління аваріями в режимах збільшення тривалості паливних кампаній.

5. На основі розробленого метода кваліфікації встановлена відсутність підстав необхідності кваліфікації періодичності планових випробувань пасивних систем безпеки в режимах збільшення тривалості паливних кампаній.

## Список літератури:

1. Lye A. et al. An Overview of Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Safety: What Has Been Done, and Where Do We Go from Here? *Journal of Nuclear Engineering*. 2024. Vol. 5, no. 4. P. 456–485. DOI: <https://doi.org/10.3390/jne5040029>
2. Apostolakis G. E. How Useful Is Quantitative Risk Assessment? *Risk Analysis*. 2004. Vol. 24, no. 3. P. 515–520. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0272-4332.2004.00455.x>.
3. Kaplan S., Garrick B. J. On The Quantitative Definition of Risk. *Risk Analysis*. 1981. Vol. 1, no. 1. P. 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x>.
4. Lukacs M., Williams L. G. Nuclear safety issues for fusion power plants. *Fusion Engineering and Design*. 2020. Vol. 150. P. 111377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111377>.
5. Ayoub A., Kröger W., Sornette D. Generic and adaptive probabilistic safety assessment models: Precursor analysis and multi-purpose utilization. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.013>.
6. Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide (NUREG/CR-2815, BNL-NUREG-51559) | Nuclear Regulatory Commission. *Homepage* | *Nuclear Regulatory Commission*. DOI: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr2815/index.html>.
7. Apostolakis G. E. The interpretation of probability in probabilistic safety assessments. *Reliability Engineering & System Safety*. 1988. Vol. 23, no. 4. P. 247–252. DOI: [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(88\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0951-8320(88)90034-8).
8. Backgrounder on Probabilistic Risk Assessment | Nuclear Regulatory Commission. *Homepage* | *Nuclear Regulatory Commission*. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/probabilistic-risk-asses>.
9. Ayoub A., Kröger W., Sornette D. Generic and adaptive probabilistic safety assessment models: Precursor analysis and multi-purpose utilization. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.013>.

10. Aksenov P. L., Komolov I. A., Molodov P. A. Development of a Risk Monitoring Model for NPPs with a VVER-440 Reactor. *Atomic Energy*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-023-00985-6>.
11. Method of Analysis of Thermophysical Properties and Composition of Nuclear Fuel During Modernization of Active Zones of Nuclear Power Reactors / V. Vashchenko et al. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24, no. 6. P. 186–191. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/168372>.
12. The method of express analysis of nuclear and ecological safety during the modernization of nuclear fuel / V. I. Skalozubov et al. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2023. Vol. 32, no. 2. P. 388–395. DOI: <https://doi.org/10.15421/112335>.
13. Скалозубов В. І., Кондратюк В. А., Дорож О. А., Філатов В. І. Порівняльний метод кваліфікації систем безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000 та АР1000. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2023. № 1 (26). С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.31717/2311-8253.23.1.1>.
14. Safety of Ukraine's nuclear power industry in extreme operating conditions / V. Skalozubov et al. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet Pratsi*. 2022. Vol. 2, no. 66. P. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.66.2022.09>.
15. Kondratyuk V. et al. Criteria for conditions of hydrodynamic instability of the coolant in accidents with reactor circuit leaks. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet Pratsi*. 2022. Т. 2. № 66. С. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.66.2022.06>.

**Skalozubov V.I., Katsarsky Yu.S., Mazur E.V., Verbilo I.M., Derbenov G.S. QUALIFICATION OF SAFETY SYSTEM TESTING STRATEGIES WITH INCREASED DURATION OF FUEL CAMPAIGNS OF NUCLEAR POWER PLANTS**

*An overview of probabilistic safety analysis (PSA) in nuclear power and prospects for future research directions are presented. It is determined that the key approach to assessing the safety level of a nuclear reactor is probabilistic safety assessment, or quantitative risk analysis, which contributes to the decision-making process taking into account hazards in reactor design, as well as in the human factor and emergency response, in order to minimize the associated severe accident possibilities. Based on the analysis of the PSA results of VVER-type nuclear power plants, the need to develop alternative methods for qualifying safety system testing strategies in modes of increasing the duration of nuclear reactor fuel campaigns has been established. An alternative risk-based method for qualifying active and passive safety systems in modes of increasing the duration of fuel campaigns is presented. It is emphasized that in the extreme conditions of wartime in Ukraine, a significant improvement of the traditional PSA methodology is necessary in relation to external extreme phenomena/events. The feasibility of using the qualification criterion of the developed method, which is the probability of failure of accident control systems for three groups of initial accident events: reactor circuit leakage to the pressurized volume of the nuclear power plant, inter-circuit leaks in the steam generator and initial events with a sealed reactor circuit, is proven. The conditions for ensuring the design reliability of accident control systems in the modes of increasing the duration of fuel campaigns are presented. The necessary modernizations of the periodicity of scheduled tests of active safety systems at reactor power are established; the absence of grounds for the need to qualify the periodicity of scheduled tests of passive safety systems in the modes of increasing the duration of fuel campaigns.*

**Keywords:** nuclear power plant, operation, safety system, periodicity of scheduled tests, efficiency, calculation methodology.

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 620.91:621.311.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/28>**Усенко А.Ю.**<https://orcid.org/0000-0001-7467-6220>

Український державний університет науки і технологій

**Форись С.М.**<https://orcid.org/0000-0001-7104-640X>

Український державний університет науки і технологій

**Біляєва В.В.**<https://orcid.org/0000-0001-9987-6384>

Український державний університет науки і технологій

## БІОМЕТАН У КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ АГРОПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення енергетичної автономності агропромислових об'єктів в умовах зростання вартості енергоресурсів і вразливості централізованих систем енергопостачання. Агропромисловий сектор України характеризується значною енергоємністю та наявністю органічної сировини, що створює передумови для використання біометану в автономних когенераційних системах. Метою статті є обґрунтування доцільності використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів з урахуванням реальних режимів електричного і теплового навантаження. Дослідження виконано з використанням розрахункового аналізу параметрів когенераційних установок на біометані, узагальнення технічних характеристик газопоршневого обладнання та застосування критеріїв енергетичної й економічної ефективності. Аналіз проводився для установок електричною потужністю 0,5–5,0 МВт із часткою утилізації теплової енергії 60–90% та регулюванням навантаження в діапазоні 50–100% номінальної потужності. Установлено, що за повного залучення теплової енергії сумарний коефіцієнт корисної дії когенераційних установок на біометані сягає 85–92%, тоді як за зниження коефіцієнта використання тепла нижче 60% ефективність когенерації істотно зменшується. Показано, що економічно прийнятні режими автономного енергопостачання відповідають строку окупності інвестицій до 6–7 років. Виявлено ключові обмеження, пов'язані з якістю біометану, сезонною нерівномірністю теплових навантажень і необхідністю адаптивного керування режимами генерації.

Наголошено, що біометан може слугувати ефективною паливною основою автономних когенераційних систем агропромислових об'єктів за умови стабілізації параметрів палива та узгодження потужності установки зі структурою енергоспоживання підприємства. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення адаптивних алгоритмів управління когенераційними установками на біометані, удосконалення технологій очищення палива та деталізацію економічної оцінки автономних енергетичних систем за повним життєвим циклом.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, розподілена генерація, автономні енергетичні системи, газопоршневі установки, енергетична ефективність, аграрна енергетика, утилізація органічних відходів.

**Постановка проблеми.** Стрімке зростання вартості енергоресурсів і підвищення ризиків порушення централізованого енергопостачання в Україні актуалізували проблему енергетичної автономності агропромислових об'єктів, які

характеризуються високою енергоємністю виробничих процесів, сезонною нерівномірністю споживання та концентрацією значних обсягів органічних відходів. За наявності такого ресурсного потенціалу використання біометану як локаль-



ного енергоносія є технічно можливим і економічно доцільним напрямом, однак його практичне впровадження в автономних когенераційних системах залишається обмеженим.

Статистичні дані свідчать, що у 2025 році Україна вперше здійснила промислові поставки біометану на зовнішні ринки, експортувавши понад 11 млн м<sup>3</sup> цього енергоносія до країн Європейського Союзу [1]. Це підтверджує сформовану спроможність українського аграрного сектора до виробництва біометану промислової якості, водночас демонструючи дисбаланс між експортною орієнтацією галузі та внутрішнім використанням біометану для забезпечення енергетичних потреб агропромислових підприємств.

Незважаючи на наявність сировинної бази та перших успішних виробничих проєктів, застосування біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів стримується низкою науково-практичних проблем. До них належать недостатня адаптація типових когенераційних рішень до змінної структури електричних і теплових навантажень аграрних підприємств, обмежена кількість узагальнених підходів до оцінювання енергетичної та економічної ефективності таких систем, а також фрагментарність досліджень, спрямованих на інтеграцію біометану саме в автономні, а не мережево-орієнтовані енергетичні комплекси.

У цьому контексті актуальним є наукове обґрунтування підходів до ефективного використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів України з урахуванням реальної структури енергоспоживання, технологічних особливостей виробництва та сучасних тенденцій розвитку української біоенергетики. Розв'язання цієї проблеми має безпосереднє значення для підвищення енергетичної безпеки агропромислового сектора, зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв і формування стійких децентралізованих енергетичних систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд сучасних наукових праць свідчить про формування кількох стійких дослідницьких кластерів, що відрізняються предметним фокусом, але водночас логічно взаємодоповнюють один одного. Передусім значна частина досліджень спрямована на оцінювання енергетичної ефективності когенераційного використання біогазу та біометану, отриманих з агропромислових відходів. У межах цього напрямку доведено, що поєднання електричної та теплової генерації дає змогу сут-

тєво підвищити загальний коефіцієнт корисної дії енергетичних систем і забезпечити автономність агропромислових об'єктів за рахунок локальних ресурсів, що обґрунтовано в дослідженні Р. Далпаза (R. Dalpaz) та співавторів [2]. Порівняльний аналіз сценаріїв виробництва електроенергії безпосередньо з біогазу та варіантів його очищення до біометану з подальшим використанням у когенераційних установках, виконаний Г. Капосчутті (G. Caposciutti) та співавторами, засвідчив відмінності у гнучкості систем, рівні енергетичної ефективності та можливостях балансування навантажень [3]. Доцільність застосування мобільних аграрних біогазових установок у когенераційному режимі, особливо для малих і середніх господарств та просторово розосереджених агропромислових об'єктів, обґрунтовано у роботах З. Яроша (Z. Jarosz) та співавторів [4].

Окремий дослідницький блок формують праці, в яких біометан розглядається як результат технологічно вдосконалених процесів анаеробного зброджування та як складова частина інтегрованих відновлюваних енергетичних систем. Систематизацію сучасних технологій виробництва біометану з акцентом на методах очищення біогазу та можливостях їх поєднання з іншими джерелами відновлюваної енергії здійснено Ф. Калізе (F. Calise) та співавторами [5]. Результати досліджень Б. Су (B. Su) та співавторів свідчать, що використання фотоелектрично-теплових систем може інтенсифікувати процеси анаеробного зброджування та збільшити вихід біометану, що має принципове значення для автономних агроенергетичних рішень [6]. Концепція Power-to-Gas як інструмент перетворення надлишкової відновлюваної енергії у форму біометану з подальшим його використанням у когенераційних установках розглянута Д. Ланні (D. Lanni) та співавторами [7]. Загальні висновки, представлені в роботах М. Міньйони (M. Mignogna) та співавторів, підтверджують, що саме інтеграція біометану з іншими відновлюваними технологіями є підґрунтям формування стійких автономних енергосистем [8].

Вагомий масив сучасних досліджень присвячено питанням моделювання, оптимізації та управління біометановими й когенераційними системами в автономних і мікромережевих конфігураціях. Підходи до оптимізації та керування повномасштабними установками ко-зброджування, запропоновані Д. Кареччі (D. Carecci) та співавторами, сприяють підвищенню стабільності виробництва біометану та ефективності його подаль-

шого енергетичного використання [9]. Модель оптимального енергетичного менеджменту мікромережі з використанням біогазу, орієнтовану на автономне забезпечення локальних споживачів, розроблено М. І. Сантосом (M. I. Santos) та співавторами [10]. Алгоритм електропостачання тваринницької ферми на основі біогазу з урахуванням змінних електричних і теплових навантажень запропоновано М. Стадніком (M. Stadnik) та співавторами [11]. Концептуальні засади функціонування автономних малопотужних енергетичних спільнот, в яких біометан і когенерація відіграють ключову роль у забезпеченні локальної енергетичної незалежності, розглянуто Ю. А. Веремійчуком (Y. A. Veremiiichuk) та співавторами [12].

Окремий напрям досліджень охоплює економічні, екологічні та стратегічні аспекти застосування біометану в автономних енергетичних системах. Результати техніко-економічної оптимізації агровольтаїчних анаеробних установок для виробництва біометану, представлені А. Н. Задом (A. N. Zad) та співавторами, підтверджують доцільність інтегрованих рішень для агропромислових підприємств [13]. Аналіз ролі біометану в заміщенні природного газу та зміцненні енергетичної безпеки, виконаний П. Марконі (P. Marconi) та Л. Роса (L. Rosa), має безпосереднє значення і для автономних аграрних енергосистем [14]. Вплив інфраструктурних і регуляторних чинників на розвиток виробництва та використання біометану детально розкрито в працях Л. Земіте (L. Zemite) та співавторів [15]. Екологічні та експлуатаційні переваги біометану, підтверджені під час аналізу транспортних систем, наведені С. Мілоїєвічем (S. Milojević) та співавторами, що додатково засвідчує універсальність цього енергоносія для автономного енергопостачання агропромислових об'єктів [16].

З огляду на національну специфіку та сучасні виклики в науковій літературі сформувався самостійний напрям, присвячений українському контексту розвитку біогазу та біометану, який поєднує енергетичні, економічні та безпекові аспекти. Зокрема, у працях Н. В. Остри та співавторів обґрунтовано, що біогаз і біометан в Україні розглядаються не лише як складова частина екологічної трансформації, а як стратегічний ресурс стійкого розвитку й відновлення енергетичної системи в умовах структурних дисбалансів та зовнішніх загроз, із визначальною роллю аграрного сектора як джерела сировини [17]. Узагальнення європейського досвіду та українських практик біоконверсії органічних відходів, здійснене І. М. Кор-

нієнком та співавторами, засвідчує необхідність адаптації технологій анаеробного зброджування до вітчизняних агропромислових умов, що створює підґрунтя для локального виробництва біогазу й подальшого переходу до біометану [18].

Енергетичну результативність біоконверсійних підходів у національних умовах підтверджено дослідженнями В. П. Резніченка та співавторів, у яких доведено доцільність використання біоконверсійних культур і аграрних відходів для зростання частки відновлюваних джерел в енергобалансі України [19]. Економічні аспекти розвитку біоенергетики проаналізовано Р. Римаром та Г. Сиротюком, які показують потенціал біометану як інструменту диверсифікації енергетичного сектора та зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв [20]. Стратегічну роль біоенергетичного потенціалу для національної енергосистеми обґрунтовано С. М. Дудніковим та співавторами на основі аналізу енергетичного балансу України, з акцентом на можливості інтеграції біогазових і біометанових технологій в автономні та децентралізовані системи енергопостачання [21]. Виробництво біометану як чинник енергетичної незалежності України та її інтеграції до європейського енергетичного простору розглянуто Н. Зеленчук [22]. Узагальнювальні підходи до альтернативної енергетики, запропоновані О. Кубатком та співавторами, підтверджують, що поєднання біометану з когенераційними технологіями формує одну з найбільш стійких моделей підвищення енергетичної резильєнтності держави [23].

Незважаючи на наявні дослідження у сфері біометану та когенераційних технологій, залишаються нерозв'язаними питання комплексного використання біометану в автономних енергетичних системах агропромислових об'єктів. Недостатньо дослідженими є аспекти узгодження режимів роботи когенераційних установок із нерівномірним електричним і тепловим навантаженням, відсутні уніфіковані критерії інтегральної оцінки енергетичної та економічної ефективності, а також обмежено вивчено проблеми адаптації обладнання до змінної якості біометану та сезонної нестабільності сировинної бази.

Запропоноване дослідження спрямовано на заповнення зазначених прогалин шляхом системного аналізу підходів до використання біометану, обґрунтування особливостей інтеграції когенераційних установок в енергетичну інфраструктуру агропромислових підприємств, формування комплексних критеріїв оцінювання ефективності та розроблення рекомендацій щодо підвищення



надійності й результативності автономного енергопостачання.

**Постановка завдання.** Метою статті є обґрунтування можливостей та доцільності застосування біометану в когенераційних установках для забезпечення автономного енергопостачання агропромислових об'єктів.

Для досягнення поставленої мети в статті передбачається розв'язання таких завдань:

1) проаналізувати сучасні підходи до використання біометану в системах автономного енергопостачання агропромислових об'єктів з урахуванням інтеграції когенераційних установок та режимів споживання енергії;

2) обґрунтувати критерії енергетичної та економічної ефективності функціонування когенераційних установок на біометані та виявити ключові науково-практичні проблеми їх упровадження в агропромисловому секторі;

3) розробити рекомендації щодо підвищення ефективності та надійності використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасні підходи до використання біометану як енергоносія в системах автономного енергопостачання агропромислових об'єктів формуються під впливом одночасного зростання енергетичних потреб аграрного сектора, посилення вимог до екологічної безпеки та необхідності підвищення стійкості локальних енергетичних систем. Біометан, отриманий шляхом очищення біогазу до якості природного газу, розглядається як універсальний енергоносіє, придатний для використання в когенераційних установках, газових котлах та газопоршневих електростанціях. Його ключовою перевагою є можливість інтеграції у вже наявну газову та енергетичну інфраструктуру агропромислових підприємств без суттєвих конструктивних змін обладнання, що істотно знижує бар'єри впровадження автономних систем енергопостачання.

У сучасних наукових і прикладних дослідженнях біометан розглядається не лише як джерело енергії, а і як елемент комплексної системи управління ресурсами агропромислового виробництва [8] (табл. 1). Органічні відходи тваринництва, рослинництва та переробної промисловості слугують сировинною базою для виробництва біогазу, який після очищення і збагачення використовується для виробництва електричної та теплової енергії в режимі когенерації. Такий підхід забезпечує замкнений виробничо-енергетичний цикл, у межах якого поєднуються енергетична авто-

номність, утилізація відходів і зменшення викидів парникових газів. Станом на середину 2025 р. в Україні функціонують 4 біометанові установки, які в сукупності забезпечують виробництво близько 41 млн м<sup>3</sup> біометану на рік, і до кінця року планується ввести в експлуатацію ще кілька об'єктів із загальною очікуваною потужністю приблизно 111 млн м<sup>3</sup>/рік, що дозволяє говорити про перехід до промислово масштабованих рішень із прогнозованим енергетичним виходом та початок комерційних поставок на внутрішній та зовнішній ринки [24; 25].

Представлені підходи реалізуються в агропромисловому секторі у вигляді енергетично автономних комплексів, у яких виробництво біометану інтегрується безпосередньо з технологічними процесами підприємства. Типовим прикладом є тваринницькі господарства та агропереробні комплекси, де стабільні потоки органічних відходів забезпечують прогнозоване завантаження біогазових установок, а очищений біометан використовується як базове паливо для когенераційних модулів [2]. За таких умов електрична енергія, отримана в режимі когенерації, спрямовується на живлення технологічного обладнання, систем вентиляції, автоматизованих ліній та допоміжної інфраструктури, тоді як теплова енергія використовується для підтримання температурних режимів виробничих процесів, сушіння сировини та обігріву виробничих приміщень.

Використання газопоршневих установок на біометані дозволяє адаптувати режими генерації до змінного добового та сезонного навантаження, що є характерним для агропромислових об'єктів. Застосування інтегрованих енергетичних комплексів, які поєднують когенерацію з елементами накопичення електричної та теплової енергії, підвищує керованість енергетичних потоків і забезпечує стабільну роботу підприємств навіть за обмеженого доступу до централізованих мереж [10, р. 1682]. Узагальнення практичного досвіду впровадження таких рішень свідчить, що біометан у когенераційних системах виконує не лише функцію альтернативного палива, а й стає ключовим інструментом оптимізації енергетичних витрат, зменшення втрат енергії та підвищення екологічної ефективності агропромислового виробництва.

Інтеграція когенераційних установок на біометані в енергетичну інфраструктуру агропромислових підприємств потребує узгодження параметрів генерації з реальними режимами споживання електричної та теплової енергії, що відзначаються сезонною та добовою нерівномірністю. На відміну

**Сучасні підходи до використання біометану в системах автономного енергопостачання агропромислових об'єктів**

| Підхід                                                       | Технологічна характеристика                                                                             | Функціональне призначення                                   | Приклади українських підприємств                                                                                                              | Показники ефективності / результативності                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Когенераційні установки на біогазі/біометані                 | Спільне виробництво електричної та теплової енергії на газопоршневих агрегатах з утилізацією тепла      | Автономне електро- і тепlopостачання технологічних процесів | Біогазова станція на базі Теофіпольського цукрового заводу (перша черга)                                                                      | Потужність першої черги: 5,1 МВт (ел.); типовий сумарний ККД когенерації: до 85–90% (за умови повної утилізації тепла)               |
| Локальні газопоршневі електростанції                         | Генерація електроенергії з біогазу / біометану (без пріоритету повної утилізації тепла)                 | Покриття піків, резервування, робота в острівному режимі    | Практичний розвиток сектора: в Україні функціонує 83–85 біогазових установок сумарною електричною потужністю близько 140 МВт                  | Орієнтир електричної ефективності газопоршневої генерації: ~38–42% (залежно від типу двигуна й режиму)                               |
| Теплогенерація на біометані                                  | Спалювання біометану в котельному обладнанні для тепла (у т.ч. конденсаційні котли)                     | Тепло для технологічних потреб та опалення                  | Секторний контекст: розвиток біометану як заміщення природного газу підтримується збільшенням виробництва біометану та виходом на експорт     | Типовий ККД сучасних котлів: 90–95% (залежно від режимів та температурних графіків)                                                  |
| Інтегровані енергетичні комплекси (біометан у ГТС / експорт) | Виробництво біометану з подачею в газотранспортну систему та/або експортними ланцюгами (у т.ч. bio-LNG) | Енергетична гнучкість, комерціалізація, експорт             | VITAGRO: подача біометану в ГТС України з добовим обсягом 6 тис. м <sup>3</sup> [26]; «ЮМ Ліквід Газ»: експорт зрідженого біометану (bio-LNG) | На середину 2025 р.: 4 біометанові установки сумарно 41 млн м <sup>3</sup> /рік; план до кінця 2025 р. – 111 млн м <sup>3</sup> /рік |

*Джерело: сформовано автором на основі [2; 3; 5; 8; 10, р. 1682; 22; 26; 27; 28; 29]*

від централізованих систем енергопостачання, локальні когенераційні комплекси функціонують у тісному зв'язку з технологічними процесами підприємства, тому їх ефективність визначається здатністю адаптуватися до змінного навантаження та забезпечувати раціональний розподіл виробленої енергії. Вирішальне значення має відповідність теплового складника когенерації потребам виробництва, оскільки саме цей фактор обмежує тривалість і стабільність роботи установки в автономному режимі (табл. 2).

Реалізація зазначених технічних рішень на сучасних агропромислових підприємствах ґрунтується на формуванні керованих енергетичних контурів, у межах яких когенераційна установка на біометані функціонує як базове джерело енергії з електричною потужністю, як правило, 0,5–5,0 МВт та можливістю регулювання навантаження в діапазоні 50–100% від номіналу. У періоди пікового електроспоживання пріоритет надається

електричній генерації для живлення виробничого обладнання, тоді як тепла енергія з коефіцієнтом утилізації до 90% акумулюється в теплових накопичувачах або використовується в низькотемпературних технологічних процесах. У міжсезонний період, у разі зниження теплового навантаження, робота установки коригується шляхом зменшення теплової потужності або часткового переходу на альтернативні джерела тепла. Практичний досвід експлуатації таких систем свідчить, що технічно оптимізована інтеграція когенераційних установок на біометані забезпечує підвищення сумарного ККД енергосистеми до 85–92%, зменшення втрат енергії та стабільність енергопостачання за змінних виробничих умов [11, с. 70–73].

Оцінювання ефективності функціонування когенераційних установок на біометані в автономних енергетичних системах агропромислових підприємств потребує поєднання енергетичних і економічних підходів, що враховують специфіку одно-

**Технічні параметри інтеграції когенераційних установок на біометані  
в енергетичну інфраструктуру агропромислових підприємств**

| Характеристика інтеграції                            | Ключові технічні параметри                                                                                                                                              | Вплив на роботу підприємства                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Узгодження з електричними навантаженнями             | Номинальна електрична потужність когенераційних модулів: 0,5–5,0 МВт; діапазон регулювання навантаження: 50–100% від номіналу; швидкість зміни потужності: 5–10%/хв     | Зменшення споживання електроенергії із зовнішньої мережі на 40–70%; покриття пікових навантажень без залучення резервних дизельних генераторів |
| Узгодження з тепловими режимами                      | Теплова потужність установки: 0,6–5,5 МВт; частка утилізації тепла: 75–90%; співвідношення електричної та теплової потужності ( $P_{el}/P_{th}$ ): 0,8–1,1              | Підвищення сумарного ККД енергосистеми до 85–92%; скорочення витрат природного газу або інших видів палива для теплогенерації                  |
| Інтеграція із системами управління                   | Автоматизовані системи керування (SCADA); контроль параметрів у реальному часі (тиск, склад газу, навантаження); коефіцієнт готовності установки (availability): 90–95% | Оптимізація режимів роботи та зменшення простоїв; стабільна робота за змінних виробничих графіків і сезонних коливань споживання               |
| Взаємодія з резервними та накопичувальними системами | Теплові акумулятори об'ємом 50–500 м <sup>3</sup> ; електрохімічні накопичувачі потужністю 0,1–1,0 МВт (за потреби); час автономної роботи без мережі: 2–8 год          | Підвищення надійності автономного енергопостачання; зменшення втрат енергії та можливість гнучкого балансування між виробництвом і споживанням |

*Джерело: сформовано автором на основі [2; 3; 9, р. 109; 10, р. 1686; 11, с. 73].*

часного виробництва електричної та теплової енергії. На відміну від традиційних джерел генерації, результативність когенераційних установок визначається не лише рівнем електричного коефіцієнта корисної дії (ККД), а й ступенем корисного використання теплової енергії та здатністю заміщати зовнішні енергоресурси. Обґрунтовані критерії оцінювання мають відображати інтегральний ефект від використання біометану як палива та забезпечувати можливість порівняння різних режимів і сценаріїв експлуатації (табл. 3).

Запропоновані критерії базуються на кількісному зіставленні обсягів спожитого біометану та фактично корисної енергії, отриманої у вигляді електроенергії й тепла. Сумарний коефіцієнт корисної дії на рівні не нижче 85% свідчить про ефективну інтеграцію когенераційної установки в енергетичну інфраструктуру підприємства, тоді як значення менше 75% указують на втрати теплової енергії або неузгоджені режими роботи [7]. Коефіцієнт використання теплової енергії є критичним показником для агропромислових об'єктів: за його значень нижче 60% когенераційна схема втрачає економічні переваги порівняно з роздільним виробництвом енергії. Економічна ефективність вважається прийнятною за строку окупності до 7 років, що відповідає практиці впровадження біометанових когенераційних проєктів в агропромисловому секторі та узгоджується з їх життєвим циклом [14].

Впровадження когенераційних систем на біометані в агропромисловому секторі супроводжується низкою взаємопов'язаних науково-практичних проблем, що зумовлені як особливостями самого енергоносія, так і специфікою виробничих умов. Однією з ключових технічних проблем підготовки біометану є забезпечення стабільної якості палива за умов змінного складу біогазу, передусім за вмістом сірководню та силосанів. Концентрація сірководню в сирому біогазі може досягати кількох тисяч частин на мільйон (parts per million, ppm), тоді як для надійної роботи газопоршневих когенераційних установок його необхідно знижувати щонайменше до 500 ppm, а для підвищення ресурсу обладнання – до рівня нижче 100 ppm. Силосани, присутні в кількостях від кількох до десятків mg/Nm<sup>3</sup>, під час згоряння утворюють абразивні кремнеземні відкладення, що прискорюють зношування двигунів і допоміжного обладнання [22]. Забезпечення таких параметрів потребує багатоступневих систем очищення біогазу та формує суттєву частку капітальних і експлуатаційних витрат у проєктах виробництва біометану. Коливання концентрації метану, наявність домішок сірководню, вологи та силосанів істотно впливають на надійність роботи когенераційного обладнання та потребують застосування багатоступневих систем очищення і контролю, що підвищує капітальні та експлуатаційні витрати [3].

**Критерії оцінювання енергетичної та економічної ефективності  
когенераційних установок на біометані**

| Група критеріїв | Показник                                   | Практичний спосіб розрахунку                                                                                           |
|-----------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Енергетичні     | Сумарний коефіцієнт корисної дії установки | Відношення сумарної корисної енергії (електричної + використаної теплової) до енергетичного вмісту спожитого біометану |
|                 | Електричний коефіцієнт корисної дії        | Частка енергії біометану, перетворена на електроенергію                                                                |
|                 | Коефіцієнт використання теплової енергії   | Частка виробленого тепла, реально використаного в технологічних процесах або системах опалення                         |
|                 | Питоме споживання біометану                | Обсяг біометану, необхідний для виробництва 1 кВт·год сумарної корисної енергії                                        |
| Економічні      | Строк окупності інвестицій                 | Відношення капітальних витрат до річної економії коштів на енергоресурсах                                              |
|                 | Питомі експлуатаційні витрати              | Сукупні річні витрати на обслуговування, поділені на вироблену електроенергію<br>Типово 0,015–0,030 €/кВт·год          |

*Джерело: сформовано автором на основі [2; 3; 7; 10. р. 1689; 13; 14]*

Суттєвим обмеженням є проблема адаптації стандартних когенераційних установок до роботи на біометані змінної якості. Більшість серійного газопоршневого обладнання проектувалася для стабільних параметрів природного газу, тому його використання з біометаном потребує коригування систем подачі палива, запалювання та керування режимами згоряння. Недостатній рівень адаптації призводить до зниження ефективності, прискореного зносу вузлів і підвищення ризику аварійних режимів, що ускладнює довготривалу експлуатацію таких систем в автономному форматі.

Експлуатаційні обмеження в агропромисловому секторі пов'язані з нерівномірністю навантажень, сезонною мінливістю теплового споживання та залежністю виробництва біометану від стабільності сировинної бази. Періодичні коливання обсягів органічної сировини або порушення технологічних режимів анаеробного зброджування безпосередньо відображаються на надійності енергопостачання [7]. Додатковою проблемою є обмежена інтеграція когенераційних систем на біометані з наявними енергетичними та автоматизованими системами управління підприємств, що ускладнює оптимізацію режимів роботи та знижує загальну ефективність енергетичної інфраструктури.

Окрему групу проблем становлять економічні та організаційні чинники, зокрема значні початкові інвестиції, тривалий строк окупності за відсутності спонукальних механізмів, а також дефіцит стандартизованих методик оцінювання ефективності таких систем.

З метою підвищення прикладної результативності використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів доцільним є врахування особливостей структури енергоспоживання та виробничих процесів конкретних підприємств. Для тваринницьких комплексів, що характеризуються відносно стабільним надходженням органічної сировини та рівномірним утворенням біогазу, пріоритетним напрямом є стабілізація якості біометану та підтримання базових режимів роботи когенераційних установок із максимальним залученням теплової енергії до технологічних і санітарно-гігієнічних потреб, що узгоджується з практикою розвитку біоенергетичних проєктів в Україні [24; 26].

Для підприємств цукрової промисловості та інших об'єктів сезонного перероблення ефективність когенераційних рішень визначається узгодженням режимів генерації з нерівномірним тепловим навантаженням упродовж року. У таких умовах доцільним є поєднання когенераційних установок із технологічними споживачами тепла в період виробничого сезону та коригування режимів роботи в міжсезонний період, що підтверджується досвідом впровадження біогазових установок на базі українських цукрових заводів [27].

Для агропромислових підприємств із розвинутою інфраструктурою зберігання та перероблення продукції, а також для інтегрованих агрохолдингів перспективним є комбінований підхід до використання біометану, за якого частина енергоресурсу спрямовується на локальну коге-

нерацію, а частина – доводиться до стандартів біометану для подачі в газотранспортну систему або подальшої комерціалізації. Реалізація таких моделей в Україні підтверджується запуском перших біометанових проєктів із закачуванням газу в газотранспортну систему та початком експортних поставок, що свідчить про зростання ролі біометану як елемента енергетичної гнучкості агропромислових підприємств [25; 28; 29].

Таким чином, ефективність і надійність використання біометану в когенераційних установках визначається ступенем відповідності технічної конфігурації системи характеру виробничих процесів та структурі енергоспоживання конкретного агропромислового об'єкта, що підтверджується сучасними українськими практиками розвитку біоенергетики.

**Висновки.** У результаті дослідження встановлено, що використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів є технічно доцільним і забезпечує підвищення енергетичної автономності за умови стабілізації параметрів палива та узгодження режимів генерації зі структурою споживання. Показано, що за ефективною інтеграції когенераційні системи на біометані забезпечують сумарний коефіцієнт корисного використання енергії на рівні 85–90%, тоді як за недостатнього залучення теплової енергії він знижується до

менше 75%, що нівелює переваги когенерації. Обґрунтовано систему критеріїв оцінювання енергетичної та економічної ефективності, яка включає показники сумарного та електричного ККД, коефіцієнта використання теплової енергії, питомого споживання біометану та строку окупності інвестицій. Встановлено, що ефективна робота когенераційних установок відповідає коефіцієнту використання тепла не нижче 70–75% і строку окупності до 6–7 років, тоді як відхилення від цих меж свідчить про неузгодженість технічної конфігурації системи з потребами підприємства. Виявлено, що основними чинниками зниження ефективності біометанових когенераційних систем є нестабільність якості палива за критичними домішками, сезонна нерівномірність теплового навантаження та обмежена адаптивність стандартного газопоршневого обладнання. Це зумовлює необхідність застосування багатоступеневих систем підготовки біометану, адаптивного керування режимами генерації та інтеграції з системами акумулювання і моніторингу. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням адаптивних алгоритмів управління когенераційними установками на біометані, удосконаленням технологій очищення біогазу та оцінюванням ефективності автономних біометанових енергетичних систем за повним життєвим циклом.

#### Список літератури:

1. Україна експортувала понад 11,2 млн кубометрів біометану у 2025 році. *AgroPortal.ua*: вебсайт. 2026. URL: <https://agroportal.ua/news/ukraine/ukrajina-eksportovala-ponad-11-mln-kubometriv-biometanu> (дата звернення: 11.01.2026).
2. Dalpaz R., Konrad O., da Silva Cyrne C. C., Barzotto H. P., Hasan C., Guerini Filho M. Using biogas for energy cogeneration: An analysis of electric and thermal energy generation from agro-industrial waste. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020. Vol. 40. Article 100774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100774>
3. Caposciutti G., Baccioli A., Ferrari L., Desideri U. Biogas from anaerobic digestion: power generation or biomethane production? *Energies*. 2020. Vol. 13, № 3. Article 743. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13030743>.
4. Jarosz Z., Kapłan M., Klimek K., Dybek B., Herkowiak M., Wałowski G. An assessment of the development of a mobile agricultural biogas plant in the context of a cogeneration system. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 22. Article 12447. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132212447>
5. Calise F., Cappiello F. L., Cimmino L., d'Accadia M. D., Vicidomini M. A review of the state of the art of biomethane production: recent advancements and integration of renewable energies. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 16. Article 4895. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14164895>
6. Su B., Wang H., Zhang X., He H., Zheng J. Using photovoltaic thermal technology to enhance biomethane generation via biogas upgrading in anaerobic digestion. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 235. Article 113965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113965>
7. Lanni D., Minutillo M., Cigolotti V., Perna A. Biomethane production through the power to gas concept: A strategy for increasing the renewable sources exploitation and promoting the green energy transition. *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 293. Article 117538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117538>
8. Mignogna D., Ceci P., Cafaro C., Corazzi G., Avino P. Production of biogas and biomethane as renewable energy sources: a review. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 18. Article 10219. DOI: <https://doi.org/10.3390/app131810219>.
9. Carecci D., Catenacci A., Ficara E., Ferretti G., Leva A. Modelling, optimisation and control of full-scale

co-digestion biomethane plants. In: *Proceedings of the 2024 IEEE 63rd Conference on Decision and Control (CDC)*. Milan, Italy, 2024. P. 106–112. DOI: <https://doi.org/10.1109/CDC56724.2024.10886344>

10. Santos M. I., Maravilha A., Bessani M., Uturbey W., Batista L. A model for optimal energy management in a microgrid using biogas. *Evolutionary Intelligence*. 2024. Vol. 17, № 3. P. 1677–1695. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12065-023-00857-9>

11. Stadnik M., Shtuts A., Yaropud V., Kupchuk I. Development of an algorithm for power supply to a livestock farm using biogas. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2025. Vol. 28, № 4. P. 61–86. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/208465>

12. Veremiichuk Y. A., Opryshko V. P., Prytyskachand I. V., Yarmoliuk O. S. Prospects for autonomous low-power renewable energy communities. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1415, № 1. Article 012120. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012120>

13. Zad A. N., Zainali S., Croci M., Guezgouz M., Impollonia G., Campana P. E., Amaducci S. Techno-economic optimization of agrivoltaic-powered anaerobic digestion plant for biomethane production. *Energy Conversion and Management*. 2026. Vol. 348. Article 120791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120791>

14. Marconi P., Rosa L. Role of biomethane to offset natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 187. Article 113697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113697>

15. Zemite L., Kleperis J., Mezulis A., Bode I., Vempere L., Jasevics A., Jansons L. Biogas production support systems for the production and use of biomethane. In: *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. Prague, Czech Republic, 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854739>

16. Milojević S., Stopka O., Orynycz O., Tucki K., Šarkan B., Savić S. Exploitation and maintenance of biomethane-powered truck and bus fleets to assure safety and mitigation of greenhouse gas emissions. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 9. Article 2218. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092218>

17. Остра Н. В., Малогулко Ю. В., Сікорська О. В., Тептя В. В., Повстянко К. Енергетика майбутнього: роль біогазу та біометану у стійкому розвитку України. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2025. Vol. 353, № 3.2. P. 400–408. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-56>

18. Корнієнко І. М., Ястремська Л. С., Кузнєцова О. О., Барановський М. М., Візер А. К. Біоконверсія органічних відходів – європейський досвід та українські практики. *Технології та інжиніринг*. 2022. № 3. P. 37–51. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.3.4>

19. Резніченко В. П., Коломієць Л. В., Тунік Т. М. Оцінка енергетичної ефективності відновлювальних джерел енергії на основі біоконверсійних культур. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. P. 229–239. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.24>

20. Римар Р., Сиротюк Г. Економічна оцінка стану та перспектив розвитку біоенергетики в контексті диверсифікації енергетичного сектору України. *Економічний простір*. 2025. № 204. P. 256–265. DOI: <https://doi.org/10.30838/EP.204.256-265>

21. Дудніков С. М., Щур Т. Г., Савченко О. А., Трунова І. М., Середа А. І., Галько С. В., Попадченко С. А. Аналіз перспектив функціонування біоенергетичного потенціалу в системах енергопостачання України на основі аналізу енергетичного балансу. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2024. Vol. 24, № 1. P. 170–183. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-12>

22. Зеленчук Н. Виробництво біометану як напрям забезпечення енергетичної незалежності України та ЄС. *Економіка та суспільство*. 2025. № 73. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-73-36>

23. Кубатко О., Калініченко Л., Треус А., Лінь Д., Міщенко Я. Альтернативна енергетика як напрям енергетичної стійкості країни. *Підприємництво та інновації*. 2024. № 32. P. 64–70. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-3583/32.10>

24. В Україні зростає виробництво біометану: вже працює 4 заводи, ще 3 запуснуть у 2025 році. *Пропозиція*. 2025. URL: <https://propozitsiya.com/news/v-ukrayini-zrostaye-vyrobnytstvo-biometanu-vzhe-pratsyuyeye-4-zavody-shche-3-zapustyat-u-2025> (дата звернення: 12.01.2026).

25. Ukraine starts biomethane exports to the EU. *Ukrainian Energy*. 2025. URL: <https://ua-energy.org/en/posts/18-06-2025-c7cd66e3-bc00-4f59-92b0-703783bd6027> (date of access: 12.01.2026).

26. Біометан в Україні: можливості та розвиток. *Біоенергетична асоціація України*: вебсайт. 2025. URL: <https://uabio.org/news/17950/> (дата звернення: 11.01.2026).

27. Теофіпольський цукровий завод офіційно запустив біогазову станцію. *AgroTimes*: вебсайт. 2019. URL: <https://agrotimes.ua/elevator/teofipolskij-cukrovij-zavod-oficijno-zapustiv-biogazovu-stanciyu/> (дата звернення: 11.01.2026).

28. VITAGRO запустила перший український біометан у газотранспортну систему України добо-

вим обсягом 6 тис. куб. м. *Reform.energy*: вебсайт. 2024. URL: <https://reform.energy/news/vitagro-zapustil-pershiy-ukrainskiy-biometan-v-gazotransportnu-sistemu-ukraini-dobovim-obsyagom-6-tis-kub-m-22968> (дата звернення: 11.01.2026).

29. ЮМ Ліквід Газ почала експортувати зріджений біометан. *ExPro*: вебсайт. 2025. URL: <https://expro.com.ua/uk/novini/yum-lkvd-gaz-pochala-eksportuvati-zrdjeniy-bometan> (дата звернення: 11.01.2026).

#### **Usenko A.Yu., Forys S.M., Biliaieva V.V. BIOMETHANE IN COGENERATION UNITS FOR THE AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY OF AGRO-INDUSTRIAL FACILITIES**

*The relevance of the study is determined by the need to increase the energy autonomy of agro-industrial facilities in the context of rising energy costs and the vulnerability of centralized energy supply systems. The agro-industrial sector of Ukraine is characterized by significant energy intensity and the availability of organic raw materials, which creates the preconditions for the use of biomethane in autonomous cogeneration systems. The purpose of the article is to justify the feasibility of using biomethane in cogeneration plants for autonomous energy supply of agro-industrial facilities, taking into account the actual modes of electrical and thermal load. The study was carried out using a computational analysis of the parameters of biomethane cogeneration plants, a generalization of the technical characteristics of gas piston equipment, and the application of energy and economic efficiency criteria. The analysis was carried out for plants with an electrical capacity of 0.5–5.0 MW with a heat utilization rate of 60–90% and load regulation in the range of 50–100% of the nominal capacity. It was found that with full utilization of thermal energy, the total efficiency of biomethane cogeneration plants reaches 85–92%, while with a reduction in the heat utilization factor below 60%, the efficiency of cogeneration decreases significantly. It has been shown that economically acceptable modes of autonomous energy supply correspond to an investment payback period of 6–7 years. Key limitations related to biomethane quality, seasonal unevenness of heat loads, and the need for adaptive control of generation modes have been identified.*

*It is emphasized that biomethane can serve as an effective fuel base for autonomous cogeneration systems of agro-industrial facilities, provided that fuel parameters are stabilized and the capacity of the installation is matched to the energy consumption structure of the enterprise. Further research should be directed towards the development of adaptive algorithms for controlling biomethane cogeneration plants, improving fuel purification technologies, and detailing the economic assessment of autonomous energy systems over their entire life cycle.*

**Keywords:** renewable energy sources, distributed generation, autonomous energy systems, gas piston installations, energy efficiency, agricultural energy, organic waste utilization.

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026



# ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 661.846

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/29>**Шокота М.Ю.**<https://orcid.org/0009-0005-2523-0309>

Дніпровський державний технічний університет

**Кравченко О.В.**<https://orcid.org/0009-0006-8833-3441>

Дніпровський державний технічний університет

**Гуляєв В.М.**<https://orcid.org/0000-0002-4991-6250>

Дніпровський державний технічний університет

**Коваленко А.Л.**<https://orcid.org/0000-0003-1496-6634>

Дніпровський державний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СИНТЕЗУ НАНОРОЗМІРНОГО МАГНІЙ ГІДРОКСИДУ З МОДИФІКОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Робота присвячена розробці та експериментальній валідації способу цілеспрямованого отримання нанорозмірного магній гідроксиду ( $Mg(OH)_2$ ) з керованими морфологічними характеристиками та поверхневою модифікацією, придатного для використання як наповнювач-антипірен у полімерних композиціях. Показано, що використання розчинів магній хлориду природного походження (бішофіту) у поєднанні з лужним реагентом (натрій гідроксидом, амоніаком або іншими гідроксидами лужних/лужноземельних металів) дозволяє керувати процесом нуклеації й росту кристалів  $Mg(OH)_2$  за допомогою введення розчинних хлоридів ( $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $CaCl_2$ ,  $NH_4Cl$ ) у момент утворення зародків. Експериментально опрацьовано як одноетапні, так і двоетапні режими синтезу з термогідротермічною обробкою при температурах 100–200 °C під аутогенним тиском, що забезпечує регулювання питомої поверхні та агломератного складу продукту. Досліджено ключову роль присутності розчинних хлоридів у момент нуклеації: вони утворюють сольватну оболонку на зародках, яка гальмує хаотичне зростання і агломерацію, що дозволяє отримувати дрібніші агломерати та керовану гетерогенність розмірного складу. Запропоновано оптимальні температурні інтервали (переважно 140–180 °C на другому етапі) для забезпечення питомої поверхні  $\leq 30 \text{ м}^2/\text{г}$ , що необхідна для застосування у полімерних композиціях. Окремо розглянуто технологічні аспекти: використання електролізу (продукт електролізу  $NaCl$ ) як джерела суміші  $NaCl+NaOH$ , можливість промивки осаду для зниження вмісту хлоридів перед високотемпературною стадією з метою зменшення корозійних вимог до апаратури та зниження обсягів стічних вод. Отримані матеріали відповідають вимогам наповнювача-антипірену: низька питома поверхня, пластинчаста морфологія первинних частинок у нанорозмірному діапазоні, ефективна поверхнева модифікація. Практична значущість методу полягає в можливості використання природних розчинів  $MgCl_2$  (бішофіту) і побічних продуктів (електролізу) для економічного синтезу високоякісного  $Mg(OH)_2$  з мінімальною кількістю додаткових очищувальних операцій, а також у гнучкості процесу для отримання матеріалів із заданими фізико-хімічними параметрами, придатних для промислового впровадження.

**Ключові слова:** магній гідроксид, осадження, фільтрація, кристалізація, поверхнева модифікація, бішофіт.

© Шокота М.Ю., Кравченко О.В., Гуляєв В.М. та ін., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



**Постановка проблеми.** Магній гідроксид ( $Mg(OH)_2$ ) знаходить широке застосування в промисловості, будівництві, медицині та сільському господарстві. Особливий інтерес представляє застосування  $Mg(OH)_2$  як антипірена у виробництві полімерних композицій, термопластів, еластомерів, гумових сумішей та в паперовій промисловості [1, с. 89]. Крім того,  $Mg(OH)_2$  є ефективною альтернативою традиційно використовуваним антипіренам, таким як хлор-, бром-, фосфоровмісні органічні сполуки. При розкладанні під час пожежі, на відміну від органічних антипіренів,  $Mg(OH)_2$  не виділяє отруйних або корозійних продуктів, має високу димо-пригнічуючу здатність.  $Mg(OH)_2$  є високоефективним наповнювачем, що надає полімерним композиціям унікальні фізико-механічні властивості при експлуатації виробів [2, с. 411].

Особливий інтерес представляє  $Mg(OH)_2$ , що має нанорозмірну пластинчасту структуру. Крім властивостей антипірену і подавлювача диму при виробництві пластиків нанорозмірний  $Mg(OH)_2$  дозволяє підвищити продуктивність обладнання та покращити споживчі властивості пластиків, такі як вогнестійкість, стійкість до ударів, хімічна стійкість, бар'єрні властивості (зниження газопроникності) [3, с. 5536]. Тобто фізико-механічні властивості не погіршуються, як при звичайних наповненнях, а значно покращуються.

У промисловості  $Mg(OH)_2$  одержують такими способами [4, с. 144]:

- з різних сортів збагаченої кускової бруситової руди шляхом сушіння, дроблення, помелу;
- гідратацією магній оксиду, який одержують випалом природної сировини (магнезиту, доломіту, бруситу) або термогідролізом магній хлориду (бішофіту);
- методом осадження  $Mg(OH)_2$  з розчинів солей природного походження (морська вода, озерна ропа, підземні розсоли та бурові води та т.п.) або синтетичного походження гідроксидом лужного або лужноземельного металу, або амонію, або карбонатом лужного металу.

Отримання  $Mg(OH)_2$  з бруситової руди є простим і економічним способом, проте родовища високоякісного бруситу, придатні для промислової розробки, трапляються рідко. Крім того, цей продукт містить велику кількість домішок.

Гідратація  $Mg(OH)_2$ , отриманого випалом магнезиту, доломіту, або бруситу, також є простим та економічним способом, але, як і в попередньому способі, продукт містить велику кількість небажаних домішок. Гідратація  $MgO$ , отриманого термогідролізом [5, с. 4073], призводить до отримання

високоякісного  $Mg(OH)_2$ , проте термогідроліз є енергоємним процесом, що вимагає дорогого корозійностійкого обладнання та супроводжується утворенням великої кількості ( $10 \text{ т/т } MgO$ ) кислих розчинів з масовою часткою  $HCl$  15-20%.

Отримання  $Mg(OH)_2$  методом осадження розчинів солей магнію є найбільш перспективним в економічному та технологічному плані для отримання наповнювача полімерних матеріалів, у тому числі і нанорозмірного [6, с. 45]. Для застосування як наповнювач і антипірен в різних полімерних матеріалах та композиціях,  $Mg(OH)_2$  повинен мати відносно низьку питому поверхню –  $\leq 20 \text{ м}^2/\text{г}$ , середній діаметр частинок у межах  $0,1-5,0 \text{ мкм}$  і бути поверхнево обробленим спеціальними модифікаторами, органічні сполуки, що являють собою, в кількості  $0,1-5,0\%$  від маси  $Mg(OH)_2$ . Роль модифікуючих добавок полягає в тому, що вони суттєво підвищують сумісність  $Mg(OH)_2$  з полімерами, знижують вологопоглинання, покращують стабільність композиційних матеріалів, а також їх фізико-механічні властивості [7, с. 180].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** З літературних джерел відомо безліч різних методів поверхневої обробки  $Mg(OH)_2$  з використанням широкої гами модифікуючих агентів. Як модифікатори зазвичай використовують граничні або ненасичені жирні кислоти з числом атомів Карбону від 8 до 30, алкілсилани, що мають принаймні одну групу, що містить не менше трьох атомів Карбону, органотитанати та органоцирконати, аміносилини та ін. Іноді здійснюють покриття поверхні частинок  $Mg(OH)_2$  двома та більше модифікуючими агентами, тобто проводять двохшарове та багатшарове нанесення [8, с. 40].

Для отримання  $Mg(OH)_2$  з низькою питомою поверхнею суспензію магній гідроксиду витримують в автоклаві при температурі  $160-200^\circ\text{C}$  аутогенному тиску або в цих умовах проводять процес отримання. Так, у роботі [9, с. 994] запропоновано спосіб отримання  $Mg(OH)_2$  взаємодією  $5,0\%$  розчину  $MgCl_2$  з водним розчином лужного реагенту. Процес проводять у періодичному чи безперервному режимі при одночасному дозуванні вихідних реагентів у суспензію  $Mg(OH)_2$ . Даний спосіб дозволяє отримувати крупнозернистий  $Mg(OH)_2$  с кристалами, середні розміри яких перевищують  $30 \text{ мкм}$ . Такий продукт може використовуватись:

- як сорбент у водопідготовці та водоочисненні;
- для нейтралізації кислих промислових та побутових стоків, очищення газів, видалення важких металів;

– у виробництві іонообмінних смол, реагентів, засобів для чищення, магнезійних в'язучих, вогнетривких цегли, базальтового волокна, у виробництві скла та кераміки.

Однак він не придатний як наповнювач при виробництві полімерних композицій.

У низці робіт [10-12] запропоновані способи отримання  $Mg(OH)_2$ , придатного для виробництва полімерних матеріалів, шляхом осадження магній гідроксиду з розчинів водорозчинних солей магнію обробкою амоніаком. Ці способи дозволяють отримувати нанорозмірний продукт з показниками форми, розміру та питомої поверхні кристалів та агрегатів кристалів  $Mg(OH)_2$ , що відповідають вимогам для наповнювача-антипірену полімерних матеріалів. Недоліком способу є те, що при синтезі необхідно використовувати великий надлишок амоніаку, а також необхідність додаткових витрат за досить складну стадію його регенерації.

У роботі [13, с. 28] описаний спосіб, заснований на осадженні  $Mg(OH)_2$  розчинів водорозчинних солей магнію не тільки амоніаком, але і гідроксидом лужного металу чи кальцію. Однак цей спосіб не передбачає модифікацію поверхні  $Mg(OH)_2$ .

Відповідно до роботи [14, с. 557],  $Mg(OH)_2$  отримують при температурі 40-120°C взаємодією різних солей магнію (фториду, хлориду, бромиду, хлорату, бромату, сульфїту, сульфату, нітрату) з надлишком гідроксиду лужного або лужноземельного металу чи амонію. Синтез проводять у присутності модифікаторів (солі органічних кислот). За цим способом отримують частинки  $Mg(OH)_2$  пластинчастоподібної форми з товщиною 3-20 нм і середнім розміром близько 1 мкм. Однак, продукт, отриманий за цим способом, має велику (більше 30 м<sup>2</sup>/г) питому поверхню, що негативно позначається на властивостях полімерних матеріалів.

**Постановка завдання.** Мета роботи – отримання нанорозмірного  $Mg(OH)_2$  з заданими характеристиками і модифікованою поверхнею, шляхом взаємодії магній хлориду (бішофіту) з гідроксидом лужного металу.

**Виклад основного матеріалу.** У реактор об'ємом 1,2 м<sup>3</sup>, з мішалкою і сорочкою, завантажували 2,7 кг розчину бішофіту з масовою часткою  $MgCl_2$  32%. Розчин при перемішуванні нагрівали до 45-50°C. Потім при перемішуванні (1000 хв<sup>-1</sup>) завантажували 7 кг електролізу з температурою 50°C, отриманого в результаті електролізу NaCl в діафрагмовому електролі-

зері. Електроліт містив 10 мас.% NaOH натрію і 15 мас.% NaCl. Реакційну масу з часткою NaCl 22% витримували протягом 0,5-1,0 год при перемішуванні, температурі 45-50°C і атмосферному тиску. Після витримки, реакційну масу фільтрували та промивали на фільтр-пресі. Осад сушили в сушарці киплячого шару іподрібнювали у дезінтеграторі. Отримували 5 кг  $Mg(OH)_2$ , що являв собою агрегати частинок з діаметром 55 мкм та питомою поверхнею 60 м<sup>2</sup>/г, при цьому первинні частинки були неправильної форми (рисунок 1). Питому поверхню визначали за методом БЕТ, середній розмір агрегатів частинок – на приладі Mastersizer методом лазерної дифракції, форму та розмір первинних частинок визначали за зображенням скануючого електронного мікроскопа.

Далі отриманий осад завантажували в реактор, додавали демінералізовану воду для отримання суспензії з масовою часткою твердої фази 10-12%. Потім нагрівали до температури 170°C витримували при цій температурі та аутогенному тиску (0,7 МПа) протягом 12 год. Після закінчення витримки реакційну масу фільтрували на фільтр-пресі. Отримували 5,1 кг  $Mg(OH)_2$ , який являв собою агрегати частинок пластинчастої форми з діаметром 2,2 мкм і питомою поверхнею 4,4 м<sup>2</sup>/г. Первинні частки мали поздовжній розмір 400-500 нм (рисунок 2).

Окрему партію одержаного осаду завантажували в реактор, додавали демінералізовану воду для отримання суспензії з масовою часткою твердої фази 10% і 10 г стеаринової кислоти. Потім реакційну масу нагрівали до температури 180°C витримували при цій температурі і аутогенному тиску 0,9 МПа протягом 12 год. Після закінчення витримки суспензію  $Mg(OH)_2$  охолоджували і подавали ультра-ротатор. В ультра-ротаторі одночасно проводили сушіння, подрібнення та додаткове модифікування. Як додатковий модифікатор використовували метилсилоксанову рідину, 50 г якої подавали в ротор одночасно з суспензією  $Mg(OH)_2$ . Отримували 5,25 кг чистого  $Mg(OH)_2$ , що являв собою агрегати частинок пластинчастої форми з діаметром 1,3 мкм та питомою поверхнею 4 м<sup>2</sup>/г. Частинки мали розмір 20-300 нм та товщину 25-45 нм (рисунок 3).

У тригорлий скляний реактор, з мішалкою, термометром і воронкою, завантажували бішофіт з масовою часткою  $MgCl_2$  5,5% і  $NH_4Cl$  11%. При кімнатній температурі та перемішуванні (1000 хв<sup>-1</sup>) у протягом 20 хв дозували розчин амоніаку з масовою часткою  $NH_3$  25%. Мольне співвідно-

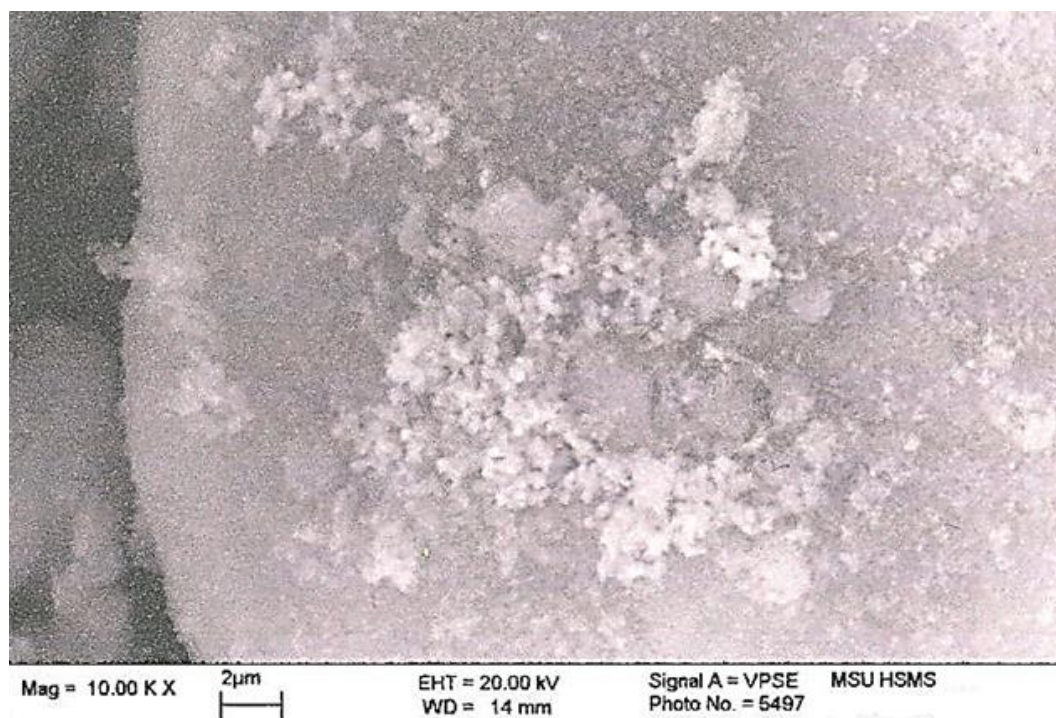


Рис. 1. Мікрофотографія частинок  $Mg(OH)_2$

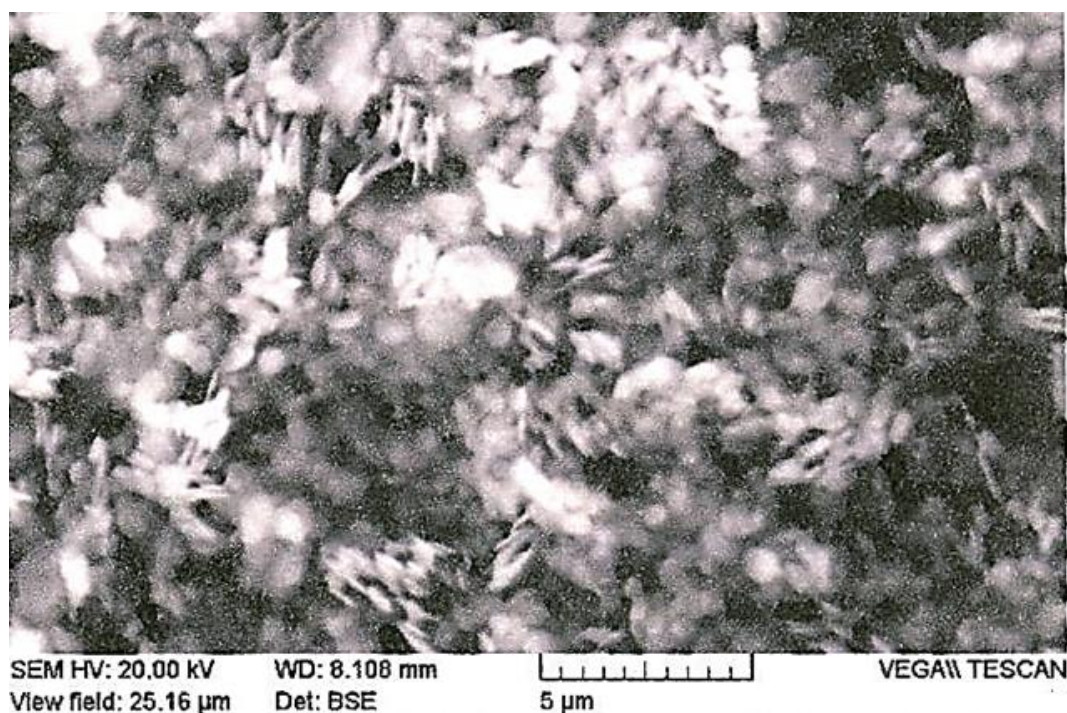


Рис. 2. Мікрофотографія частинок  $Mg(OH)_2$  після 12-годинної витримки при аутогенному тиску

шення « $NH_4OH:MgCl_2$ » становило 2:1. Реакційну масу при перемішуванні нагрівали до температури 50°C витримували 30 хв при атмосферному тиску. Після закінчення витримки суспензію  $Mg(OH)_2$  фільтрували на лабораторному вакуум-фільтрі, осад багаторазово промивали від солей репуль-

пацією з наступною декантацією. Відмиту від солей суспензію фільтрували на лабораторному вакуум-фільтрі, вологий осад сушили у сушильній шафі при температурі 105°C. Висушений осад подрібнювали в кульовому млині. Отриманий із виходом 99,8% від теоретичного  $Mg(OH)_2$  являв



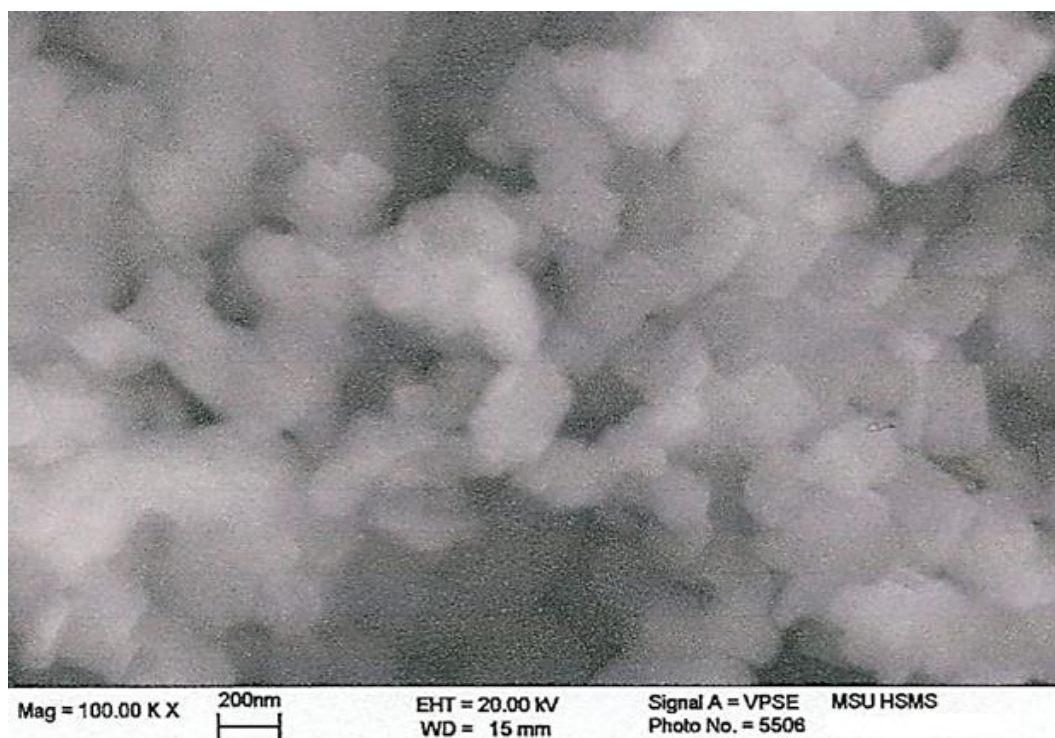


Рис. 3. Мікрофотографія частинок  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  після обробки стеариною кислотою

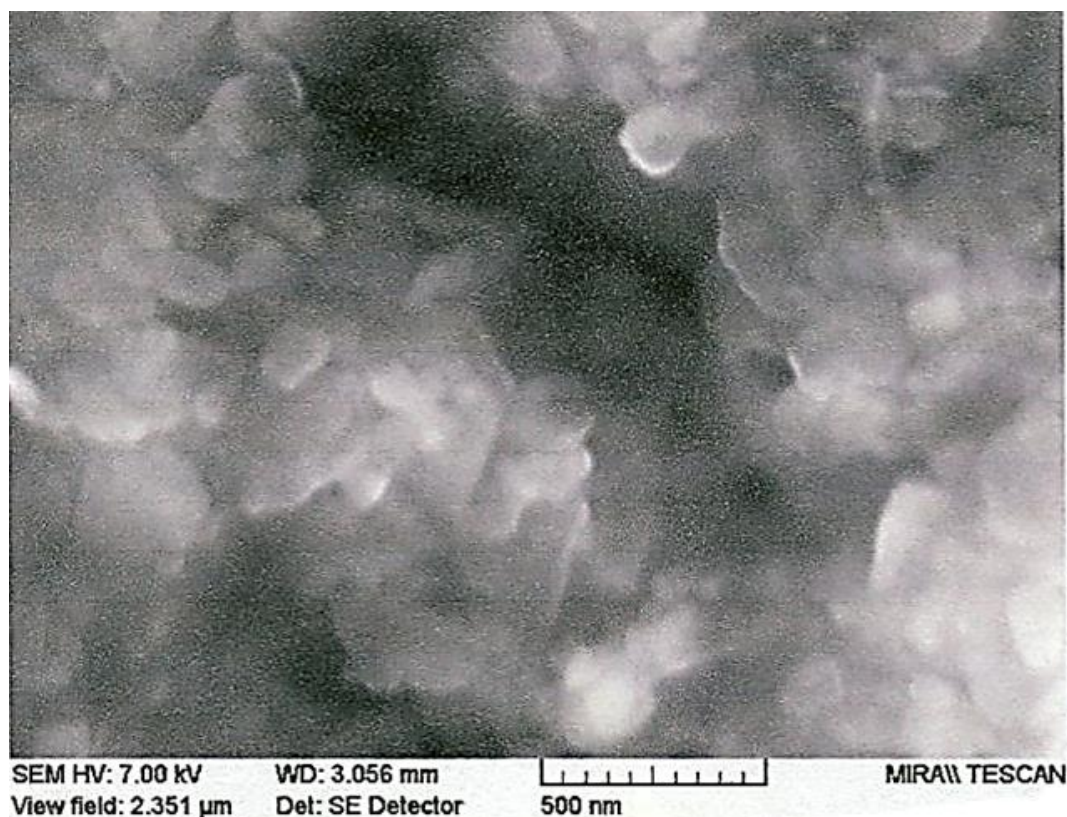
собою агрегати частинок з діаметром 0,85 мкм та питомою поверхнею 8 м<sup>2</sup>/г. Первинні частинки мали поздовжній розмір 200-400 нм та товщину 20-40 нм (рисунок 4).

Наявність у реакційному середовищі хлоридів натрію, калію, кальцію, або амонію в момент утворення зародків кристалів  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  дуже важлива. Вказані хлориди утворюють сольватну оболонку на поверхні зародків кристалів, яка перешкоджає хаотичному зростанню частинок та їх агрегації. За відсутності зазначених хлоридів утворюються великі кристали та агрегати. У міру збільшення концентрації вказаних хлоридів, утворюються все дрібніші агрегати, що призводить до отримання  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , що складається з неоднорідних за розміром та формою кристалів.

Шляхом регулювання початкової концентрації хлоридів в реакційній суміші, а також температури процесу і інтенсивності перемішування, вдалося отримати  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  із заданими характеристиками, такими як питома поверхня, форма і розмір частинок та агрегатів частинок. Процес проводили в періодичному режимі, в один етап при температурі до 200°C та атмосферному тиску або у два етапи: на першому етапі при температурі 100°C атмосферному тиску, але в другому етапі – при температурі  $\leq 200^\circ\text{C}$  під аутогенним тиском, який створювався парами води в замкнутому об'ємі.

При отриманні  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  у два етапи доцільно проводити перший етап, що протікає при температурі 100°C при атмосферному тиску, тобто у відкритому об'ємі. На другому етапі температуру  $\leq 200^\circ\text{C}$  у відкритому об'ємі створити неможливо, тому його проводили в закритому об'ємі при аутогенному тиску, який створювався парами води при температурі процесу. Слід зазначити, що при температурі 100°C утворювалися частинки з питомою поверхнею  $\geq 30$  м<sup>2</sup>/г. Для отримання частинок  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  з питомою поверхнею  $\leq 30$  м<sup>2</sup>/г, що необхідно для його застосування в полімерах, процес слід проводити при температурі 100-200°C, оптимально – при 140-180°C. За такої температури хлориди лужних металів або амонію значно прискорюють утворення кристалів  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  з мінімальною питомою поверхнею, однак такі умови вимагають дорогих конструкційних матеріалів для обладнання, наприклад, титану. У цих умовах сталі та сплави схильні до корозії, що особливо небезпечно, оскільки процес проводять під тиском.

Враховуючи це, після першого етапу  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  відмивали від хлоридів, а на другому етапі витримували демінералізовану воду при температурі 140-180°C. Цей прийом знижує швидкість утворення кристалів  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  з низькою питомою поверхнею та вимагає обладнання більших габаритів, проте допускає використання більше

Рис. 4. Мікрофотографія частинок  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  після обробки амоніаком

дешевих конструкційних матеріалів. Крім того, це дозволяє отримувати  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  з мінімальним вмістом хлоридів. При цьому хлориди лужних металів або амонію можна подавати у водному розчині відповідного гідроксиду або розчині  $\text{MgCl}_2$ . Як вихідний розчин можна використовувати фільтрат, отриманий при виділенні  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  з реакційної суміші. Це дозволяє знизити витрату демінералізованої води та зменшити кількість стічних вод.

Як сировину використовували також електролуг, отриманий в результаті електролізу  $\text{NaCl}$  в діафрагмовому електролізері. Електролуг являв собою водний розчин з масовою часткою  $\text{NaCl}$  12-15% та масовою часткою  $\text{NaOH}$  10-12%. При отриманні високоякісного  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  розчини  $\text{MgCl}_2$  піддають очищенню від сполук, що містять  $\text{Br}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Al}$ , важкі метали, а також від сульфідів, сульфатів, карбонатів та фосфатів лужних металів.

Виділення  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  проводили різними способами: декантацією, згущенням, фільтруванням з подальшим промиванням від солей, сушінням і помелом. Сушіння  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  переважно проводили в розпилювальній сушарці, а помел – у кульовому млині.

При необхідності, поверхню  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  обробляють модифікаторами. Модифікатор вносять у кількості від 0,1 до 5,0 мас.% у розрахунку сухий  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Модифікацію проводять окремою стадією або поєднують з процесом синтезу. Як модифікатори використовують:

- граничні та ненасичені жирні кислоти, що містять від 8 до 20 атомів Карбону (стеаринова, олеїнова, лаурилова або пальмітинова);
- алкілсульфати, алкілсульфонати або їх кислоти;
- різні елементоорганічні сполуки фосфору, кремнію, титану, цирконію та/або їх суміші;
- фосфорорганічні кислоти та їх солі;
- похідні Силіцію: алкілсилоксани, вінілсілани, аміносилани;
- органічні титанати та цирконати.

Пропонований у роботі спосіб дозволяє цілеспрямовано отримувати  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , що складається з нанорозмірних частинок з питомою поверхнею  $\leq 100 \text{ м}^2/\text{г}$ . Первинні частки мають переважно пластинчасту форму з поздовжнім розміром 600 нм та товщиною 60 нм. Вторинні частки є агрегати з первинних частинок неупорядкованої або впорядкованої форми та мають середній розмір  $\leq 50 \text{ мкм}$ . Запропонований спосіб отримання

$\text{Mg}(\text{OH})_2$  дозволяє отримувати мікро- та/або нанорозмірний продукт з модифікованою поверхнею, який є не тільки ефективним антипіреном, але й надає полімерам покращені фізичні властивості.

**Висновки.** Розроблений спосіб дозволяє цілеспрямовано отримувати  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  нанорозмірної пластинчастої морфології з керованими параметрами (питома поверхня, розмір первинних частинок та агломератів) шляхом регулювання концентрації хлоридів у момент нуклеації, температури та режиму гідротермічної обробки.

Показано, що двоетапний режим (початкове осадження при  $\approx 100^\circ\text{C}$  на атмосферному тиску з подальшою гідротермічною обробкою при  $140\text{--}180^\circ\text{C}$  під аутогенним тиском) ефективний для отримання продукту з питомою поверхнею  $\leq 30\text{ м}^2/\text{г}$ , придатного як наповнювач-антипірен.

Внесення органічних модифікаторів у кількості  $0,1\text{--}5,0\text{ мас.}\%$  підвищує сумісність  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  з полімерними матрицями, знижує вологопоглинання та поліпшує технологічні властивості композицій.

Використання електролізу ( $\text{NaCl} + \text{NaOH}$ ) і бішофіту як вихідної сировини робить технологію економічно привабливою; промивка осаду перед високотемпературною стадією дозволяє зменшити корозійні вимоги до обладнання та обсяг стічних вод.

Отримані матеріали демонструють хороші властивості як антипірени та димопригнічувачі та можуть бути впроваджені в промислове виготовлення полімерних композицій за умови оптимізації масштабування та контролю залишкового вмісту хлоридів.

### Список літератури:

1. Zhao M., Liu P. Thermal stabilities of poly (vinyl chloride)/magnesium hydroxide (PVC/MH) composites. *Materials Research Innovations*. 2007. Vol. 11. №. 2. P. 88–91. <https://doi.org/10.1179/143307507X196635>
2. Taglieri G. et al.  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  nanoparticles produced at room temperature by an innovative, facile, and scalable synthesis route. *Journal of Nanoparticle Research*. 2015. Vol. 17. №. 10. P. 411. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3212-1>
3. Tai C. Y. et al. Synthesis of magnesium hydroxide and oxide nanoparticles using a spinning disk reactor. *Industrial & engineering chemistry research*. 2007. Vol. 46. №. 17. P. 5536–5541. <https://doi.org/10.1021/ie060869b>
4. Гуляєв В. М. та ін. Огляд способів виробництва магній оксиду. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2025. Т. 1. №. 46. С. 143–151. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.46.2025.17>
5. Mironyuk I. F. et al. Magnesia formed on calcination of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  prepared from natural bischofite. *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252. №. 12. P. 4071–4082. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.06.020>
6. Sichov M., Boryak K., Kolomiets L. Technology for Obtaining Highpure Magnesium Compounds Using the Hydrolytic Processes of Sedimentation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1. №. 6. P. 43–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253544>
7. Коваленко А. Л. та ін. Екологічно-економічні аспекти видобутку магній оксиду з бішофіту. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2025. Т. 2. №. 47. С. 178–186. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.47.2025.20>
8. Taranenkova V. V., Korekian P. Y. Influence of inorganic additives on the water resistance of a magnesium binder. *Voprosy Khimii & Khimicheskoi Tekhnologii*. 2025. №. 1. P. 39–44. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2025-158-1-39-44>
9. Komov I. L., Kulish E. Methods of exploration and investigation of the Magnesian raw material in Ukraine. *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century*. 2022. P. 993–996. <https://doi.org/10.1201/9781003077503-253>
10. Tikhomirov E. A. et al. Proposals for developing raw-material base for magnesia production. *Refractories*. 1991. Vol. 32. №. 9. P. 533–537. <https://doi.org/10.1007/BF01287546>
11. Shand M. A. Occurrence of Magnesia Minerals and Production of Magnesium Chemicals and Metal. *The Lightest Metals: Science and Technology from Lithium to Calcium*. 2015. Vol. 4. P. 287. <https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc2343>
12. Shayakhmetova R. A. et al. Magnesium and silicon recovery from chrysotile asbestos waste of the deposit Zhitikara, Kazakhstan. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. №. 1. P. 31866. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83239-0>
13. Holywell G. C. Magnesium: The first quarter millennium. *JOM*. 2005. Vol. 57. №. 7. P. 26–33. <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0248-1>
14. Миронюк І. Ф. та ін. Будова та морфологічні особливості частинок гідроксиду магнію, одержаного методом осадження. *Physics and chemistry of solid state*. 2008. Т. 9. №. 3. С. 555–563.



**Shokota M.Yu., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. RESEARCH INTO THE PATTERNS OF SYNTHESIS OF NANOSCALE MAGNESIUM HYDROXIDE WITH A MODIFIED SURFACE**

*This study presents the development and experimental validation of a controlled synthesis route for nanosized magnesium hydroxide ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) with a tailored morphology and surface modification, intended for use as a flame-retardant filler in polymer composites. It is demonstrated that precipitation from magnesium chloride solutions (bischofite) combined with alkaline reagents (sodium hydroxide, ammonia) enables precise control over nucleation and crystal growth by introducing soluble chlorides ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) at the moment of seed formation. Both single-stage and two-stage synthesis regimes with hydrothermal treatment at 100–200 °C under autogenous pressure were studied to control the specific surface area and agglomerate structure. This study highlights the pivotal role of soluble chlorides in nucleation. Chloride ions create a solvation shell at the crystal seeds, suppressing uncontrolled particle growth and agglomeration and enabling the formation of finer agglomerates and controllable size distributions. Optimal second-stage hydrothermal conditions (preferably 140–180 °C) were identified to achieve specific surface areas  $\leq 30 \text{ m}^2/\text{g}$  required for polymer-filler applications. Technological aspects were addressed, including the use of electroluge (a by-product of  $\text{NaCl}$  electrolysis) as a source of  $\text{NaCl}$  and  $\text{NaOH}$ , washing protocols to reduce chloride content before high-temperature treatment (to lower corrosion requirements and wastewater volumes), and surface modification with organic agents (saturated fatty acids) in amounts of 0.1–5.0 wt. % to improve polymer compatibility, decrease moisture uptake, and enhance processing stability. The resulting materials meet the key specifications for flame-retardant fillers: low BET surface area, nanoscale plate-like primary particles, and effective surface treatment. The proposed method allows economical production from natural  $\text{MgCl}_2$  solutions and process side streams, offering flexibility to obtain  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  with target physico-chemical parameters suitable for industrial implementation.*

**Keywords:** *magnesium hydroxide, precipitation, filtration, crystallization, surface modification, bischofite.*

Дата першого надходження статті до видання: 21.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 621.357  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/30>

**Бровін О.Ю.**

<https://orcid.org/0000-0002-9064-1199>  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**Коваленко Ю.І.**

<https://orcid.org/0000-0002-7523-8545>  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**Лещенко С.А.**

<https://orcid.org/0000-0003-2918-9575>  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**Дерібо С.Г.**

<https://orcid.org/0000-0002-1790-9857>  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## ВПЛИВ ІОНІВ НІТРАТУ НА АНОДНУ ПОВЕДІНКУ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ

Магній та його сплави широко використовуються як конструкційні та функціональні матеріали в аерокосмічній, автомобільній та електронній промисловості. Однак їх застосування в якості анодів в системах електрохімічного захисту та резервних джерелах живлення ускладнюється негативним диференц-ефектом, який спричиняє високі швидкості саморозчинення, що призводять до втрат металу, які сягають 70-80%. Для пом'якшення цих проблем пропонується використовувати  $\text{NaNO}_3$  як екологічно чистий інгібітор для регулювання кінетики анодного процесу. У цьому дослідженні вивчається анодна поведінка промислового сплаву МА2-І (система  $\text{Mg-Al-Zn-Mn}$ ) та експериментального сплаву МС (система  $\text{Mg-Pb}$ , 2-3%  $\text{Pb}$ ) у модельних електролітах, що містять  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  та  $\text{NaNO}_3$ . Аналіз результатів потенціодинамічних і гальванодинамічних поляризаційних досліджень свідчить, що нітратні іони суттєво впливають на перебіг електрохімічних процесів в системі електрод-електроліт. Присутність іонів  $\text{NO}_3^-$  зміщує потенціал анодного розчинення на 300-500 мВ у бік більш позитивних значень порівняно з чистими розчинами хлориду або сульфату, що вказує на сильне інгібування процесу розчинення. Аналіз результатів гальванодинамічних досліджень виявив три окремі стадії анодного процесу. На першій стадії відбувається різкий стрибок потенціалу через утворення  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  і дифузії іонів  $\text{NO}_3^-$  в поверхневий оксидний шар. На другій стадії відбувається зміщення потенціалу в негативний бік, спричинене оголенням поверхні та прискоренням хімічної реакції між магнієм і водою. Третя стадія характеризується стабільним позитивним зміщенням потенціалу, де іони нітрату діють як активні пасиватори, забезпечуючи рівномірне розчинення. Результати досліджень дозволяють зробити висновок, що експериментальний сплав МС демонструє нижчу швидкість розчинення та вищу стабільність поляризації порівняно зі стандартним сплавом МА2-І у всіх протестованих розчинах. Кількісні оцінки показують, що використання хлоридно-сульфатно-нітратних розчинів-активаторів забезпечує для сплаву МС ступінь захисту 86,4-91,0%. Ці результати підтверджують, що іони нітрату ефективно пригнічують саморозчинення і здатні подовжити термін служби захисних систем на основі магнію.

**Ключові слова:** магній, інгібітор, нітрат, анодне розчинення, саморозчинення, поляризаційні дослідження



**Постановка проблеми.** Магній і його сплави мають комплекс корисних фізико-механічних властивостей, тому вони є поширеним конструкційним і функціональним матеріалом для багатьох галузей машинобудування. Їх широко використовують в космічній індустрії і авіабудуванні. Застосування таких матеріалів в кузовних деталях, двигуні та шасі автомобіля дозволяє суттєво знизити вагу і підвищити паливну ефективність транспортних засобів. З магнію і його сплавів формують корпуси та компоненти для ноутбуків і цифрових гаджетів. Вони поширені в суднобудуванні і часто використовуються у різних видах військової техніки. Вкрай важливим є застосування анодних матеріалів з магнію і його сплавів у системах електрохімічного протекторного захисту від корозії. Також ці матеріали є незамінними для багатьох конструкцій резервних хімічних джерел струму. Серед суттєвих недоліків конструкційних і функціональних матеріалів потрібно відмітити небезпеку швидкої корозії [1]. На існуючих промислових сплавах магнію з цинком, алюмінієм і марганцем під час перебігу анодного процесу спостерігається так званий негативний диференц-ефект (Negative Difference Effect, NDE) [2], який є причиною нерівномірної корозії і аномально високої швидкості саморозчинення. Цей недолік не дозволяє реалізувати енергетичний потенціал магнію і його сплавів як анодних матеріалів. NDE в хлоридних і сульфатних розчинах призводить до великих втрат металу через саморозчинення і дезінтеграцію (до 70-80%).

Для пом'якшення цих негативних ефектів потрібні нові матеріали на основі магнію, які дозволять зменшити швидкість корозії і саморозчинення з повним збереженням високої електрохімічної активності. Корозійний процес магнію складається з двох суміщених процесів: розчинення магнію і відновлення води до водню. Тому перспективним шляхом гальмування корозії є введення у склад сплавів магнію невеликої кількості інших металів, які демонструють підвищену перенапругу реакції відновлення водню, наприклад, свинцю. Не менш важливим методом обмеження швидкості анодного розчинення магнію і його сплавів в електрохімічних системах є використання інгібіторів корозії, а саме екологічно безпечного нітрату натрію  $\text{NaNO}_3$ .

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Завдяки високій теоретичній ємності та низькому стандартному електродному потенціалу магній є поширеним анодним матеріалом в системах протекторного захисту і резервних джерелах струму.

Однак його практичне використання обмежене високою швидкістю саморозчинення, зумовленого NDE. Одним з методів гальмування надмірної швидкості корозії таких анодних матеріалів є використання аніонів-інгібіторів  $\text{NO}_3^-$ .

Відомо, що іон нітрату впливає на процес виділення водню, швидкість формування захисних плівок та регулює кінетику процесу розчинення магнію.

У роботі [3] проаналізовано результати масштабного скринінгу, де нітрати є одним з найбільш високоєфективних інгібіторів. Автори використовували сучасні електрохімічні методи для оцінки впливу аніонів на швидкість корозії та анодну активність чистого магнію та його промислових сплавів AZ31, AZ91, WE43. Дослідження доводить, що нітрат-іони є одними з небагатьох сполук, здатних суттєво змінювати механізм NDE. Для хімічних джерел струму це означає можливість підвищення коефіцієнта використання металу за рахунок зниження саморозчинення під час розряду. За висновками авторів, нітрати сприяють утворенню тонких, але щільних оксидних шарів, які, на відміну від пухкого гідроксиду магнію  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , забезпечують кращий контроль анодного процесу. Для систем протекторного захисту важливою є здатність нітратів запобігати пітинговій корозії. Автори надають кількісні дані щодо ефективності, де нітрати демонструють показники понад 80% у нейтральних середовищах. Глибокий аналіз морфології поверхні після взаємодії з нітратами підтверджує перехід від локалізованого руйнування до більш рівномірного розчинення, що є ідеальним для роботи магнієвого протектора.

Автором роботи [4] детально проаналізовано електрохімію сплавів магнієвих протекторів в різних сольових розчинах, зокрема в нітратних. Нітрати рекомендуються як компоненти засипок та електролітів. Присутність нітратів запобігає пасивації магнієвих протекторів і регулює розчинення металу в агресивних ґрунтах. Також пояснено феномен NDE і механізм його гальмування аніонами  $\text{NO}_3^-$ .

Значна частина роботи [5] присвячена модифікації електролітів для повітряно-магнієвих хімічних джерел струму добавками  $\text{NaNO}_3$  і  $\text{KNO}_3$ , які визнані автором ключовими компонентами для підвищення енергоефективності. Нітрати дозволяють підвищити розрядну напругу та ємність батареї за рахунок мінімізації саморозряду анода. Встановлено, що додавання нітратів у хлоридні електроліти допомагає змінити структуру продук-

тів корозії, роблячи їх більш проникними для іонів магнію і водночас захищаючи металеву поверхню від неконтрольованого руйнування. Наведено механізм активації анода, в якому нітрати відіграють роль регулятора швидкості розчинення. Системи з електролітами, що містять нітрати, демонструють високу стабільність при низьких густинах струму. Нітратні добавки дозволяють значно подовжити термін зберігання хімічних джерел струму, що активуються водою.

В роботі [6] автори досліджували синергетичний ефект комбінації нітрату натрію та саліцилату натрію як добавок до хлоридного електроліту. Доведено, що нітрат-іони відіграють вирішальну роль у гальмуванні саморозчинення анода шляхом формування пасивної плівки. Встановлено, що нітрати змінюють баланс між анодним розчиненням магнію та виділенням водню і нітратна добавка дозволяє досягти рекордного коефіцієнта використання анода – 82% при густині струму 5 мА/см<sup>2</sup>. Експериментально підтверджено рівномірність морфології розчинення сплавів серії AZ та Mg-Ca у присутності нітратів. Також зафіксовано зменшення в 3-4 рази об'єму утвореного водню порівняно з чистим хлоридним електролітом.

У дослідженні [7] наведено результати аналізу параметрів ефективності магнієвих анодів в агресивних середовищах з вмістом нітратів. Встановлено, що пористість матеріалу та наявність нітрат-іонів мають синергетичний вплив на швидкість розчинення. В нітратних електролітах такі аноди мають більш стабільний робочий потенціал порівняно з хлоридними і сульфатними середовищами. Доведено, що нітрати сприяють утворенню більш міцного каркаса з продуктів корозії, який запобігає передчасному руйнуванню сердечника протектора.

Авторами роботи [8] досліджено одну з головних проблем магнієвих протекторів – саморозчинення та поглинання водню. Експериментально доведено, що аніони NO<sub>3</sub><sup>-</sup> зменшують поглинання водню магнієвою матрицею під час анодного розчинення. Нітрати суттєво змінюють баланс між виділенням водню та формуванням захисного оксидного шару. Встановлено, що нітрати ефективно пригнічують анодне виділення водню, обумовлене NDE, що є критично важливим для підвищення коефіцієнта корисної дії протекторів у системах захисту від корозії.

Таким чином, численними дослідженнями доведено, що нітрати можуть як гальмувати саморозчинення магнію і його сплавів, формуючи плівки Mg(OH)<sub>2</sub>/MgO, так і активувати анодний

процес розчинення металу шляхом деполяризації катодного процесу. Аніон NO<sub>3</sub><sup>-</sup> є одним з найбільш ефективних засобів для радикального зниження небажаного NDE і відповідного утворення водню. В присутності нітратів розчинення магнієвого протектора є більш рівномірним, що подовжує термін його служби в системах протекторного захисту.

Нажаль, дослідження впливу нітратів на анодні процеси на сплавах магній-свинець у літературі практично відсутні.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження швидкості анодного розчинення сплаву магнію MA2-1, який містить 3,8-5,0% Al, 0,8-1,5% Zn, 0,3-0,7% Mn, і сплаву MC, який містить Pb 2-3%, в хлоридно-сульфатних розчинах з добавкою NaNO<sub>3</sub>.

**Виклад основного матеріалу.** Анодні процеси досліджувались на сплаві магнію MA2-1, який широко використовується як матеріал анодів для протекторного захисту і експериментального сплави MC, що є перспективним матеріалом для протекторів і електродів хімічних джерел струму.

Поведінка сплавів вивчалась за зміни швидкості розчинення електродів шляхом зміни потенціалу або густини струму, тобто потенціодинамічними і гальванодинамічними поляризаційними методами. Склади модельних розчинів, що містили Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl і NaNO<sub>3</sub> наведено в табл. 1 і вони були наближені до складів розчинів-активаторів протекторних систем і хімічних джерел струму.

Таблиця 1  
**Склад модельних розчинів  
для потенціодинамічних і гальванодинамічних  
поляризаційних досліджень**

| Номер розчину | Компонент                       | Концентрація, моль/дм <sup>3</sup> |
|---------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1             | NaNO <sub>3</sub>               | 0,59                               |
| 2             | NaCl                            | 0,17                               |
|               | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 0,35                               |
|               | NaNO <sub>3</sub>               | 0,59                               |
| 3             | NaCl                            | 0,17                               |
|               | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 1,41                               |
|               | NaNO <sub>3</sub>               | 0,59                               |

На рис. 1 наведено анодні поляризаційні залежності для сплаву MA2-1 та сплаву MC, отримані у розчині 1 (табл. 1). На рис. 2 наведено поляризаційні залежності у хлоридно-сульфатно-нітратних сумішах з різним вмістом сульфату (розчини 2 і 3, табл. 1). Дія розчину NaNO<sub>3</sub> проявляється у зміщенні анодного потенціалу (E<sub>a</sub>) у бік вищих пози-

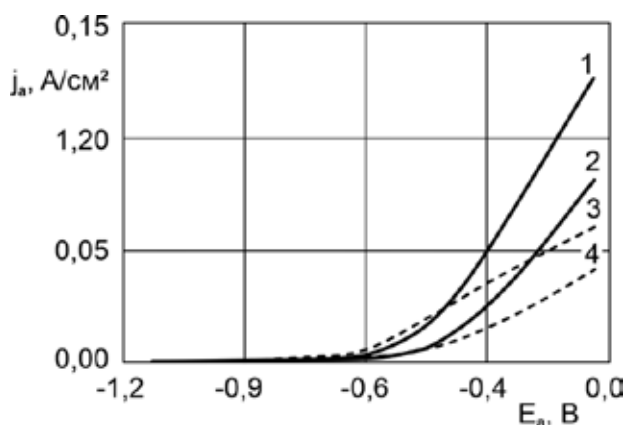


Рис. 1. Анодні поляризаційні залежності для сплаву МА2-1 (1, 2) і сплаву МС (3, 4) в розчині 1 (табл. 1) при швидкості зміни потенціалу, В/с: 1, 3 –  $1 \cdot 10^{-2}$ ; 2, 4 –  $5 \cdot 10^{-2}$

тивних значень. Присутність іона  $\text{NO}_3^-$  зміщує поляризацію на 300 – 500 мВ в бік позитивних значень порівняно з розчинами  $\text{NaCl}$  і  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Хід поляризаційних залежностей характеризується зміщенням потенціалу від стаціонарного в бік позитивних значень з деяким збільшенням швидкості процесу при  $E_a > -0,3$  В (рис. 1),  $E_a > -0,7 \div -0,45$  В (рис. 2а),  $E_a > -0,8 \div -0,5$  (рис. 2б).

Для електроду зі сплаву МС відзначається більша поляризація у всіх трьох розчинах при різних швидкостях зміни потенціалу. У разі збільшення швидкості зміни потенціалу швидкість анодного процесу зменшується. Це можна пояснити більшою швидкістю доставки аніонів до поверхні електрода, що призводить до пришвидшеного блокування поверхні іонами  $\text{NO}_3^-$ . При збільшенні концентрації іона сульфату у розчині 3 збільшення швидкості розчинення відбувається за більш негативних потенціалів.

На рис. 3 – 5 наведено анодні гальванодинамічні залежності для сплаву МА2-1 та магнієвого сплаву МС у нітратному розчині 1 та хлоридно-сульфатно-нітратних сумішах (розчинах 2 і 3). Зміна густини струму відбувалась в межах від 0 до  $0,05$  А/см². На отриманих графічних залежностях потенціалу від густини струму можна виділити три ділянки.

У нітратному розчині 1 на рис. 3 на першій ділянці спостерігається різке зміщення (стрибок) потенціалу до позитивних значень, яке для швидкостей зміни струму  $v = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $1 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}$  та  $1 \cdot 10^{-2}$  А/с на сплаві МА2-1 відповідно становить 0,65; 0,9; 1,09; 1,31 В (рис 3а).

Для сплаву МС (рис. 3б) стрибки потенціалів виражені меншою мірою і становлять 0,48; 0,61; 0,7; 1,22 В для  $v = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $1 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}$  та  $1 \cdot 10^{-2}$  А/с, відповідно. Зі зростанням швидкості зміни струму максимальне значення потенціалу змінюється в бік позитивних значень. Ймовірно, на цій ділянці відбувається утворення гідроксиду магнію, а іони  $\text{NO}_3^-$ , які мають високу проникну здатність, дифундують в поверхневий оксидний шар. В результаті в приелектродному шарі за умов анодної поляризації накопичуються іони магнію з утворенням нітрату і гідроксиду магнію. Відмінність у стрибках потенціалу пояснюється тим, що шар утвореного  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  на сплаві МС є більш стійким і складніше руйнується в порівнянні з шаром на сплаві МА2-1. На другій ділянці поляризаційних залежностей спостерігається зміщення потенціалу електрода в негативну сторону до значень  $-0,8 \div -0,35$  В для сплаву МА2-1 і  $-0,8 \div -0,15$  В для сплаву МС в залежності від швидкості зміни струму. На цій ділянці відбувається оголення поверхні електрода, що прискорює

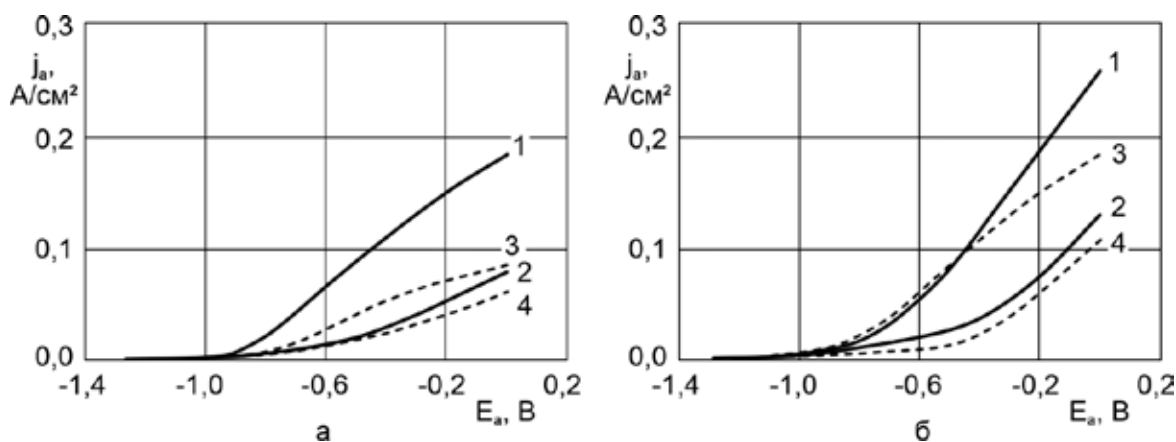


Рис. 2. Анодні поляризаційні залежності для сплаву МА2-1 (1, 2) і сплаву МС (3, 4) в розчині 2 (а) і розчині 3 (б) при швидкості зміни потенціалу, В/с: 1, 3 –  $1 \cdot 10^{-2}$ ; 2, 4 –  $5 \cdot 10^{-2}$

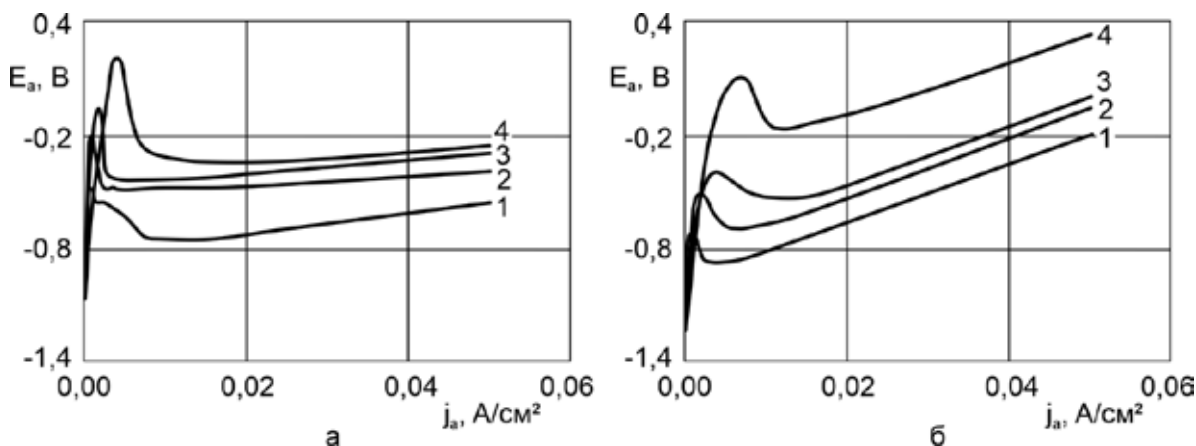


Рис. 3. Анодні гальванодинамічні залежності для сплаву МА2-1 (а) і сплаву МС (б) в розчині 1 при швидкості зміни потенціалу, А/с: 1 –  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 –  $1 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $1 \cdot 10^{-2}$

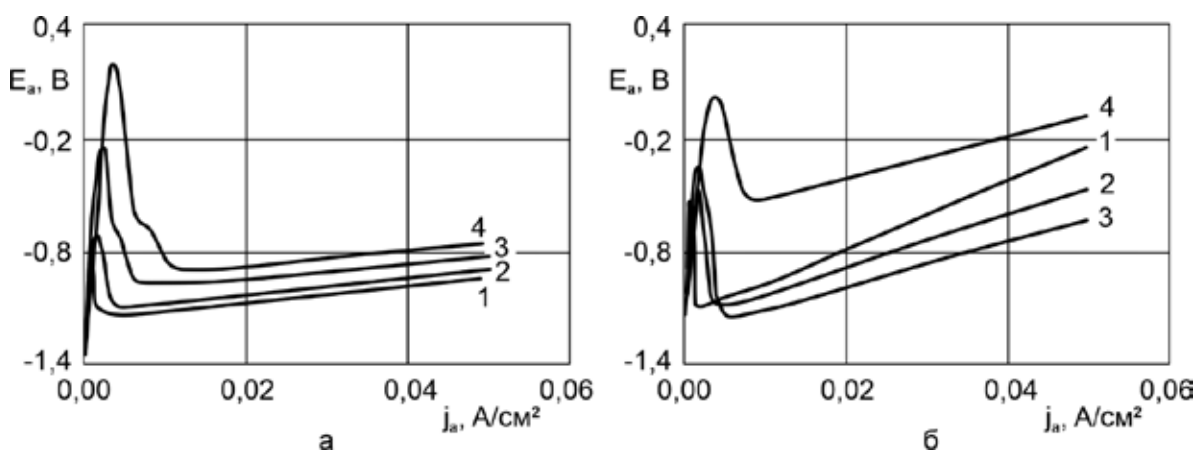


Рис. 4. Анодні гальванодинамічні залежності для сплаву МА2-1 (а) і сплаву МС (б) в розчині 2 при швидкості зміни потенціалу, А/с: 1 –  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 –  $1 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $1 \cdot 10^{-2}$

хімічну реакцію магнію з водою. Більш пологий хід залежностей на сплаві МС (рис. 3б) і зміщення потенціалу до менш негативних значень свідчить про більш повільне оголення поверхні. Третя ділянка гальванодинамічних залежностей характеризується рівномірним зміщенням потенціалу в бік більш позитивних значень. Для сплаву МС потрібно відзначити більший нахил залежностей порівняно зі сплавом МА2-1.

На рис. 4 наведено анодні гальванодинамічні залежності для сплавів магнію в хлоридно-сульфатно-нітратному розчині 2.

На першій ділянці стрибки потенціалів становлять 0,32; 0,55; 0,9; 1,27 В для сплаву МА2-1 (рис. 4а) і 0,65; 0,75; 0,83; 1,22 В для сплаву МС (рис. 4б) при  $v = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $1 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}$  та  $1 \cdot 10^{-2}$  А/с відповідно. На цій ділянці відбувається утворення  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , а також адсорбція іонів  $\text{Cl}^-$  та  $\text{SO}_4^{2-}$  з витісненням поверхневого оксиду. Іони  $\text{NO}_3^-$  дифундують у поверхневий шар, створюючи

захисну плівку. Під час видалення з поверхні електрода поверхневого оксиду і іонів  $\text{OH}^-$  на графіках спостерігається зміщення потенціалу в негативний бік до величин  $-1,1 \div -0,95$  В для сплаву МА2-1 і  $-1,1 \div -0,55$  В для сплаву МС в залежності від швидкості зміни струму. Друга ділянка залежностей характеризується більш пологим зміщенням потенціалу в негативний бік для обох магнієвих сплавів порівняно з залежностями для хлоридно-сульфатних електролітів, що пояснюється повільнішим руйнуванням поверхневого захисного шару через присутність у розчині  $\text{NO}_3^-$ . Третя ділянка графіків характеризується меншим нахилом у порівнянні з залежностями для хлоридно-сульфатних розчинів як для сплаву МА2-1, так і для сплаву МС. Це пояснюється активною дією іонів-пасиваторів  $\text{NO}_3^-$ .

При збільшенні концентрації сульфату (розчин 3, табл. 1) на рис. 5 зміщення потенціалу на першій ділянці відбувається до менш позитивних значень проти графіків на рис. 4.

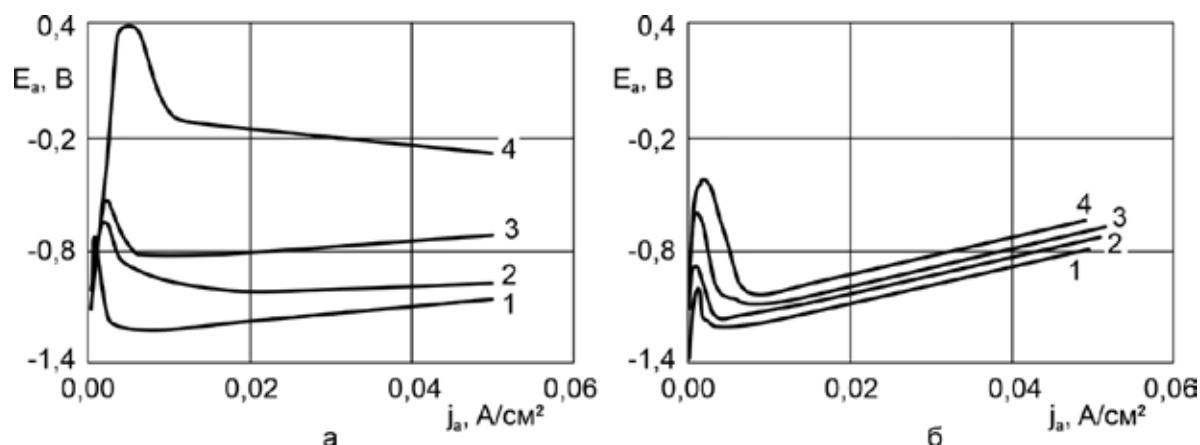


Рис. 5. Анодні гальванодинамічні залежності для сплаву МА2-1 (а) і сплаву МС (б) в розчині 3 при швидкості зміни потенціалу, А/с: 1 –  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $1 \cdot 10^{-2}$

Відповідні стрибки потенціалів становлять 0,6; 0,65; 0,75; 1,7 В для сплаву МА2-1 (рис. 5а) і 0,37; 0,44; 0,72; 0,85 В для сплаву МС (рис. 5б).

Аналіз гальванодинамічних залежностей свідчить, що у присутності нітратних іонів перебіг анодного процесу для сплавів магнію відбувається при більш позитивних потенціалах на всіх трьох ділянках залежностей у порівнянні з хлоридно-сульфатними розчинами.

Для оцінки ефективності нітратного інгібітору було проведено гравіметричне дослідження швидкості розчинення сплаву МС в двох модельних розчинах складу  $\text{NaCl}$  – 0,17 моль/дм<sup>3</sup>,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 0,35 моль/дм<sup>3</sup> з додавання  $\text{NaNO}_3$  у кількості 0,59 моль/дм<sup>3</sup> і без додавання  $\text{NaNO}_3$ . На підставі результатів гравіметричних досліджень було розраховано ступінь захисту  $Z$  (%), який є кількісною характеристикою ефективності інгібітору корозії, що показує, наскільки присутність інгібітору знижує швидкість розчинення сплаву. Розрахунок відбувався за формулою:

$$Z = 100 \cdot (V_0 - V_i) / V_0 \quad (1)$$

де  $V_0$  – швидкість корозії без інгібітору, г/(м<sup>2</sup>·год);  $V_i$  – швидкість корозії з інгібітором, г/(м<sup>2</sup>·год).

Результати розрахунку свідчать, що ступінь захисту нітратного інгібітору в таких умовах становить 86,4 – 91,0 %.

**Висновки.** Вивчено анодну поведінку сплавів магнію МА2-1 і МС у розчині  $\text{NaNO}_3$  та хлоридно-сульфатно-нітратних розчинах-активаторах з різним вмістом сульфату. Результатами поляризаційних досліджень доведено, що швидкість розчинення сплаву МС менша порівняно зі сплавом МА2-1 у всіх використаних розчинах. В присутності іону нітрату потенціал перебігу анодних процесів суттєво зміщується в бік більш позитивних значень, що призводить до значного гальмування розчинення. Розрахунок ступеня захисту нітратного інгібітору у хлоридно-сульфатно-нітратних розчинах на сплаві МС показав, що у присутності іону нітрату швидкість корозії знижується на 86,4 – 91,0 %.

#### Список літератури:

1. Wei L., Gao Z. Recent research advances on corrosion mechanism and protection, and novel coating materials of magnesium alloys: a review. *RSC Advances*. 2023. Vol. 13, no. 12. P. 8427–8463. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2ra07829e>
2. Anodic dissolution dictates the negative difference effect (NDE) of magnesium corrosion more in chemical pathway / W. Zhang et al. *Materials Letters*. 2018. Vol. 232. P. 54–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.069>
3. Comprehensive screening of Mg corrosion inhibitors / S. V. Lamaka et al. *Corrosion science*. 2017. Vol. 128. P. 224–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.07.011>
4. Song G.-L. Corrosion of magnesium alloys. Woodhead Publishing Limited, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857091413>
5. Recent progress on flexible zn-air batteries / Y. Zhang et al. *Energy storage materials*. 2021. Vol. 35. P. 538–549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.09.008>
6. Synergistic mixture of electrolyte additives: a route to a high-efficiency mg-air battery / D. Snihirova et al. *The journal of physical chemistry letters*. 2020. Vol. 11, no. 20. P. 8790–8798. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.0c02174>



7. Performance assessment of magnesium anodes manufactured by sintering process / J. A. Sanmiguel-May et al. *Metals*. 2021. Vol. 11, no. 3. P. 406. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030406>

8. Nazarov A., Yurasova T., Marshakov A. Hydrogen absorption and self-corrosion of mg anode: influence of aqueous electrolyte species. *Corrosion and materials degradation*. 2024. Vol. 5, no. 3. P. 350–369. DOI: <https://doi.org/10.3390/cmd5030015>

#### **Brovin O.Yu, Kovalenko Yu.I., Leshchenko S.A, Deribo S.G. INFLUENCE OF NITRATE IONS ON THE ANODIC BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOYS**

*Magnesium and its alloys are widely utilized as structural and functional materials in aerospace, automotive, and electronic industries due to their high energy efficiency and low density. However, their application as anodes in electrochemical protection systems and reserve power sources is hindered by the Negative Difference Effect, which causes high self-dissolution rates, leading to metal losses of up to 70-80%. To mitigate these issues, the use of  $\text{NaNO}_3$  as an environmentally friendly inhibitor is proposed to regulate the kinetics of the anodic process. This study investigates the anodic behavior of the industrial MA2-1 alloy (Mg-Al-Zn-Mn system) and the experimental MC alloy (Mg-Pb system, 2-3% Pb) in model electrolytes containing  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ , and  $\text{NaNO}_3$ . Using potentiodynamic and galvanodynamic polarization methods, the research demonstrates that nitrate ions significantly modify the electrode/electrolyte interface. The presence of  $\text{NO}_3^-$  ions shifts the anodic dissolution potential by 300-500 mV toward more positive values compared to pure chloride or sulfate solutions, indicating strong inhibition of the dissolution process. The galvanodynamic analysis revealed three distinct stages of the anodic process. In the first stage, a sharp potential jump occurs due to the formation of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  and the diffusion of  $\text{NO}_3^-$  ions into the surface oxide layer. The second stage involves a negative potential shift caused by surface exposure and the acceleration of the chemical reaction between magnesium and water. The third stage is characterized by a steady positive shift, where nitrate ions act as active passivators, ensuring uniform dissolution. The study concludes that the experimental MC alloy exhibits a lower dissolution rate and higher polarization stability compared to the standard MA2-1 alloy across all tested solutions. Quantitative estimates show that the use of chloride-sulfate-nitrate solutions provides a protection degree of 86.4-91,0% for the MC alloy. These findings confirm that nitrate ions effectively suppress Negative Difference Effect, thereby extending the service life of magnesium-based protection systems.*

**Keywords:** magnesium, inhibitor, nitrate, anodic dissolution, self-dissolution, polarization studies.

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Володимиров В.В.**<https://orcid.org/0009-0003-7353-5065>

Український державний університет науки і технологій

## НАНОДОБАВКИ У КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ, ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЯХ, ВПЛИВ НА РЕОЛОГІЮ, МІКРОСТРУКТУРУ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОННИХ З'ЄДНАНЬ

У сучасному виробництві електроніки використання везвідмивальних (no-clean) флюсів, які являють собою функціональні композити, стало базовим підходом завдяки екологічним і економічним перевагам усунення стадії відмивання після паяння. Водночас тонкі полімеризовані залишки флюсу залишаються на поверхні друкованих вузлів протягом усього життєвого циклу й за несприятливих умов (підвищена вологість, конденсація, тонкі зазори, висока щільність монтажу) можуть перетворюватися з пасивного діелектрика на слабкий електроліт, знижуючи опір ізоляції поверхні та ініціюючи електрохімічну міграцію. Регламентовані методики SIR-випробувань (IPC-TM-650 2.6.3.7) показують, що навіть у галоген-вільних системах ризик деградації зберігається через присутність іонних продуктів реакції активатора та гігроскопічність фрагментів полімерної матриці. Додатковим викликом для no-clean залишків є сумісність з внутрішньосхемним контролем (ICT) та адгезія конформних покриттів. У статті розглянуто сучасний напрям фізичної модифікації флюсу шляхом введення твердих нанодобавок (вуглецевих нанотрубок і графенових нанопластин) у зв'язуючу фазу, що перетворює флюс на нанокompозитну суспензію. Показано, що такі добавки здатні формувати перколяційну 3D-мережу, підвищуючи тіксоотропність паяльної пасты, зменшуючи осідання та ризик перемичок під час друку через трафарет. Продемонстровано, що оксидні наночастинки ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та ін.) можуть стабілізувати флюсову матрицю й змінювати в'язкопружні властивості, підвищуючи друкованість паст і відтворюваність геометрії паяних з'єднань. З'ясовано, що вуглецеві наноформи (графен, CNT) переважно демонструють ефекти мікроструктурного «рафінування»  $\beta$ -Sn (олова) та диспергування інтерметалідів, що корелює з підвищенням механічної стабільності паяних з'єднань і стійкості до деградації у термоциклах, за умови контролю дисперсності та чистоти наноматеріалу. Виділено невирішені проблеми впровадження: недостатня уніфікація протоколів довготривалих кліматичних випробувань для наномодифікованих залишків; обмежена відтворюваність через агломерацію та чутливість до якості диспергування; вплив домішок і поверхневої хімії наночастинок на кислотність та іонну забрудненість флюсу; компроміс між підвищенням активності флюсу й збереженням низької залишкової провідності.

**Ключові слова:** функціональні композити, паяльна паста, нанодобавки, вуглецеві нанотрубки, графен, SIR, електрохімічна міграція.

**Постановка проблеми.** Перехід електронної промисловості від обов'язкового відмивання після паяння до «no-clean» технології був зумовлений, зокрема, обмеженням використання хлорфторвуглеців унаслідок Монреальського протоколу та необхідністю зменшення екологічного навантаження. Концепція no-clean передбачає, що залишок флюсу після оплавлення має бути хімічно інертним і електрично непровідним, аби його можна було залишати на платі без ризику корозії

та витоків струму. Проте практика експлуатації високощільних монтажів показала, що тонкі прозорі плівки залишків можуть поглинати вологу, дисоціювати іонні компоненти та знижувати SIR, а також ініціювати електрохімічну міграцію (ECM) за наявності постійного зміщення потенціалів між провідниками [1]. Додатково no-clean залишки ускладнюють внутрішньосхемний контроль через формування твердих лакоподібних плівок на тестових майданчиках, що потребувало спеціальних



«probe-testable» рецептур [2]. Отже, забезпечення надійності електронних вузлів у сучасних умовах мініатюризації вимагає одночасної оптимізації хімії активаторів та керованої фізичної модифікації флюсу, зокрема із залученням нанодобавок, які можуть поліпшувати реологію пасти й механічні властивості паяних з'єднань без погіршення електрохімічної стабільності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ключові ризики по-clean технології пов'язані зі змінами властивостей залишків під впливом вологості й температури та з наявністю іонних продуктів реакції активаторів. У методичних документах IPC-TM-650 (2.6.3.7) SIR-тестування виконується в умовах підвищеної вологості та температури, що імітує критичні режими експлуатації і дозволяє відстежувати деградацію поверхневої ізоляції [1, с. 1–4]. Практико-орієнтовані огляди виробників наголошують, що «по-clean» не є абсолютною гарантією відсутності відмов і у високонадійних застосуваннях залишки можуть вимагати видалення перед нанесенням конформних покриттів або при роботі з малими зазорами [6, с. 2–4; 3]. Поглиблені дослідження термічної деградації активаторів показують, що суміші слабких органічних кислот можуть розкладатися та залишати різні фрагменти, які впливають на корозійну поведінку та електричну надійність збірок [9, с. 95–101]. Паралельно з хімічною оптимізацією активаторів розвивається напрям наномодифікації флюсів і паст: показано, що введення вуглецевих нанодобавок (CNT, графен) у пасти на основі SAC-сплавів може покращувати міцність і втомну довговічність за рахунок подрібнення зерен та дисперсійного зміцнення [12, с. 1215–1219; 13, с. 791–796]. У роботах щодо Ni-покривних CNT демонструється зростання міцності з'єднань та зміни інтерфазної реакції при старінні [14, с. 2482–2485]. Невирішеними лишаються:

1- відтворювана дисперсія наночастинок у флюсі-носії без агломерації та без погіршення друкоздатності пасти;

2- оцінка впливу нанодобавок на електрохімічні показники по-clean залишку (SIR/ECM) у реальних профілях оплавлення, включно з «тіньовими» зонами під корпусами BGA;

3- узгодження наномодифікованих систем із вимогами ICT та адгезією конформних покриттів, оскільки зміна складу смоли та введення твердих домішок потенційно змінюють поверхневу енергію і характер полімеризації залишку

**Постановка завдання.** Метою статті є систематизація підходів до введення нанодобавок

у безвідмивальні флюси та паяльні пасти і обґрунтування їхнього впливу на реологічні властивості пасти на етапі друку/монтажу; мікроструктуру та механічні характеристики паяних з'єднань після оплавлення. Опис потенційних ризиків для електрохімічної надійності (SIR/ECM), сумісності з ICT та конформними покриттями.

**Виклад основного матеріалу.** В останній чверті XX століття індустрія збирання електронних модулів функціонувала в рамках певної стратегії, яка хоч і була ефективною, несла в собі значні екологічні ризики. Домінуючі на той час флюси на основі каніфолі (Rosin, R) та їхні активований варіант (RMA, RA) були незамінними для забезпечення якісного паяння однак їхні залишки мали високу корзину активності та іонну провідність що вимагало обов'язкового етапу очищення друкованих вузлів після завершення циклу пайки. Найпоширенішими засобами для відмивання друкованих плат були хлорфторвуглеці (ХФВ), такі як CFC-113 (трихлортрифторетан), які відмивали дуже непогано, але спричиняли певну руйнацію озонового шару атмосфери.

Поява Монреальського протоколу в 1987 році, який суттєво обмежував використання хлорфторвуглеців змусила всю електронну промисловість докорінно переглянути свої технологічні процеси. Виробники електроніки опинились перед вибором: або інвестувати в розробку нових та дуже коштовних систем відмивання на водній основі чи розробляти нові (і не завжди ефективні) розчинники, або створити щось радикально нове.

Саме тоді була започаткована революційна, на той момент, концепція "No-Clean" (безотмивної) технології. Вона полягала в тому що хімічна формула флюсів, які являють собою композитні матеріали, повина бути такою, щоб їх залишки, після закінчення циклу пайки ставали настільки хімічно інертними, непровідними та некорозійними, що їх можна було б безпечно залишати на поверхні друкованої плати на весь термін її експлуатації. Це обіцяло колосальні економічні переваги: зменшення затрат та часу на виробництво, завдяки усуненню процесу відмивання як такого, значні екологічні переваги а також економію води, енергії та хімікатів. Перші покоління безотмивних флюсів, зазвичай з низьким вмістом твердих речовин (Low SContentolids t, LSC) та класифікацією ROL0 (Rosin, Low activity, Halide-free) за стандартом J-STD-004, без затримок вийшли на ринок, та набули певної популярності. Однак дуже швидко були виявлені недоліки цієї технології.

З'ясувалося, що термін "No-Clean" є скоріш маркетинговим описом процесу (відсутність миття), а ніж точним хімічним описом залишку. Залишки нікуди не зникали, вони просто перетворювалися з видимого шару каніфолі на тонкі, прозорі, майже невидимі плівки. І після певного періоду експлуатації вони почали демонструвати частково прогнозовану, а частково непередбачувану та небезпечну поведінку. Фундаментальний парадокс полягав у тому, що залишок, який проходив кваліфікаційні тести в ідеальних лабораторних умовах, у реальному умовах ставав джерелом катастрофічних відмов. Це виявило низку глибоких, взаємопов'язаних проблем, що вимагали не просто оптимізації, а фундаментальної перебудови хімії флюсів.

Найбільш руйнівною проблемою стала невід'ємна властивість більшості органічних залишків – гігроскопічність. Залишки флюсу, особливо ті, що містять полярні хімічні групи (залишки активаторів, смол), почали активно абсорбувати молекули води з навколишнього повітря, особливо в умовах підвищеної вологості. Цей процес абсорбції вологи запускав ланцюгову реакцію хімічної та електричної деградації, що проявлялася у двох основних механізмах відмови:

А) Зниження опору ізоляції поверхні (Surface Insulation Resistance, SIR) – це ключовий параметр, що визначає електричну надійність друкованого плати. Він вимірює опір між двома сусідніми провідниками. У сухому стані залишки забезпечували необхідний високий опір ( $> 1 \times 10^9$  Ом), згідно стандарту [1]. Але коли залишки флюсу, які мали певну гігроскопічність, поглинали вологу вони перетворювалися з твердого діелектрика на слабкий, але активний електроліт. Іонні компоненти, що завжди присутні в залишку (навіть у флюсах класу L0, де є солі металів – продукти реакції активатора з оксидами), дисоціювали у цій поглинутій воді. Це створювало провідний шар на поверхні плати. Це викликало дуже серйозні наслідки, SIR почав різко падати, нерідко одразу на декілька порядків, суттєво знижуючись нижче рівня  $10^8$  Ом, який вимагають стандарти IPC [1]. Це, при під'єднанні до живлення, проявлялось у появі струмів витoku (leakage currents) між доріжками. Що у високоомних аналогових схемах, або цифрових схемах з високим імпедансом спричиняло появу "блукуючих" сигналів, які дестабілізували роботу схеми загалом та викликали збої в окремих логічних узлах та пристроях.

Б) Появі електрохімічної міграції (EXM) яка являє собою рост провідних доріжок (дендритів)

між сусідніми провідниками. На відміну від зниження SIR, який має тимчасовий дестабілізуючий характер, поява дендритів остаточно виводила електронний вузол або прилад з ладу. Для запуску EXM необхідні три компоненти, які ідеально зійшлися на платі із залишками флюсу:

1. Наявність напруги (постійний зсув потенціалу між провідниками).

2. Наявність електроліту (гігроскопічний залишок, що поглинув вологу).

3. Наявність іонів металу (які завжди присутні).

Цей процес протікає за класичним електрохімічним сценарієм: на аноді металеве олово (Sn) або мідь (Cu) окислюються та розчиняються в електроліті у вигляді позитивно заряджених іонів ( $\text{Sn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ). Під дією електричного поля ці іони мігрують через провідні залишки флюсу до катода, там вони відновлюються, осаджуючись у вигляді чистого металу. Оскільки цей процес триває безперервно, на катоді починає рости гостра металева структура, схожа на корінь дерева або кристалічний морозний візерунок – дендрит. Дендрит росте у напрямку до анода, і в той момент, коли він здолає діелектричний проміжок (що особливо небезпечно на компонентах з малим кроком, таких як BGA), відбувається незворотне коротке замикання. Типовий приклад формування дендриту можна побачити на Рис. 1.

Електричні відмови були не єдиною проблемою. Залишки безотмивних флюсів створили низку нових проблем на виробничій лінії, які зводили нанівець усю економію від відсутності миття:

А. Несумісність із внутрішньосхемним контролем (ICT). Після завершення виробництва кожна плата проходить фінальний контроль на стенді "bed-of-nails", який являє собою так зване "ложе з голок" де сотні підпружинених голок-щупів (probes) торкаються контрольних точок (test pads), для перевірки цілісності електричних ланцюгів, або вимірюючи тестовий опір. Однак перші безотмивні флюси, особливо ті, які виготовлялись на основі синтетичних смол, після завершення циклу пайки полімеризувались у твердий, склоподібний лак. Цей лак був непробивною перешкодою для щупів. Голка щупа або не могла його проткнути, або швидко забруднювалася липким залишком флюсу, втрачаючи електричний контакт. Як наслідок, це призводило до цілої низки "хибних відмов" (false failures), коли на тестовому стенді відбраковувались ідеально робочі плати. В результаті або суттєво підвищу-



Рис. 1. Сформований дендрит між двома контактами [15]

вались витрати на діагностику, ручну перевірку та очищення тестових точок, або ці трати взагалі ставали непомірно високими. Це стало настільки серйозною проблемою, що корпорації такі як IBM були змушені запатентувати спеціальні формули флюсів, залишки яких були би крихкими та легко руйнувалися щупом з голкою на кінці [2].

Б. Відшарування вологозахисних покриттів. Для пристроїв, що працюють у жорстких умовах (автомобільна, військова, аерокосмічна техніка), плати після паяння покривають фінальним вологозахисним (конформним) покриттям. Це покриття має діяти як ефективний водозахисний та герметизуючий бар'єр для зовнішньої вологи. Однак з'ясувалося, що більшість вологозахисних покриттів (уретанових, акрилових) мають жахливу адгезію до залишків безотмивного флюсу, залишок має низьку поверхневу енергію що не дозволяло покриттю належним чином "змочити" та прилипнути до поверхні плати [3]. В результаті покриття відшаровувалося, утворюючи під собою локальні пустоти та мікропорожнини, які ставали ідеальними місцями для конденсації вологи, створюючи локальні "інкубатори" для корозії та електрохімічної міграції – саме тих проблем, для боротьби з якими це покриття і призначалося.

Одже на початку 2000-х років стало очевидно, що проблема "No-Clean" вимагає негайного вирішення. Недостатньо було просто зробити флюс "малоактивним". Стало зрозуміло, що залишок невід'ємний компонент фінальної збірки, який повинен мати власний, чітко спроектований набір механічних, хімічних та електричних властивостей. Ця криза надійності стала каталізатором для

фундаментальних досліджень у галузі хімії матеріалів, вона змусила промисловість перейти від простого варіювання пропорцій каніфолі до розробки складних синтетичних систем. Завданням стало не просто "прибрати" активні інгредієнти, а перетворити сам залишок з пасивної загрози на активний захисний елемент – бар'єр, що є водночас гідрофобним, механічно надійним, електрично ізолюючим та сумісним з подальшими процесами.

Отже у центрі проблеми, яка обумовлює зниження опору ізоляції поверхні (SIR) та електрохімічну міграцію (ECM), знаходиться ключовий компонент будь-якого флюсу – активатор. Активатор це хімічний ігредієнт флюсу, єдиною метою якого, є хімічне видалення (відновлення) оксидних плівок, в першу чергу  $\text{SnO}_2$  та  $\text{CuO}$ , з поверхонь паяних з'єднань та розплавленого припою на друкованій платі [4]. Без активатора розплавлений припій не зможе змочити металеву поверхню, що призведе до дефектів паяння, однак саме активатор та продукти його реакції (солі металів) є головним джерелом іонних забруднень, які, поглинаючи вологу, перетворюють нешкідливий залишок на електроліт. Таким чином, як буде описано далі, еволюція хімії активаторів – це пошук ідеального балансу сполуки, яка є достатньо "агресивною", щоб впоратися зі стійкими оксидами безсвинцевих припоїв при високих температурах, але водночас здатна до повної самонейтралізації, випаровування або полімеризації під час термопрофілю паяння.

Історично основою всіх флюсів (включно з першими безвідмивними) була каніфоль (Rosin). Унікальність каніфолі полягає в тому, що вона

є одночасно і активатором, і зв'язуючим (носієм), її активуючою діючою речовиною є переважно абієтинова кислота ( $C_{20}H_{30}O_2$ ), складна органічна молекула з однією карбоксильною групою ( $-COOH$ ). Успішне використання каніфолі в епоху свинцевого паяння (Sn-Pb) ґрунтувалося на її ідеальній подвійній природі:

1. Під час паяння: При нагріванні ( $170-190^\circ C$ ) абієтинова кислота ставала достатньо активною для видалення оксидів олова та міді.

2. Після паяння: При охолодженні каніфоль переходила у твердий стан, перетворюючись на твердий, склоподібний, непровідний і, що найважливіше, гідрофобний (водовідштовхувальний) матеріал. Ці залишки каніфолі ефективно запечатували будь-які непрореаговані залишки кислоти та утворені солі металів (абієтати олова), створюючи їх фізично недоступними для вологи.

Однак доведена шкідливість свинцю вимусила виробників перейти на безсвинцеве паяння (директива RoHS), безсвинцеві сплави (наприклад, SAC305) вимагають значно вищих пікових температур оплавлення ( $245-260^\circ C$ ) порівняно зі свинцевими ( $\sim 220^\circ C$ ). Дослідження термічної поведінки каніфолі, задокументоване в [5], чітко показало, що при таких температурах природні смоли та їхні похідні зазнають термічної деградації. Вони не просто плавилися – вони "вигорали". Наслідками цього стали:

- Недостатня активність: Абієтинова кислота часто вигорала ще до того, як встигала видалити стійкіші оксиди безсвинцевих сплавів.
- Провідні залишки: Продукти термічного розкладу (обвуглені залишки) ставали темними, естетично неприйнятними і, що найгірше, часто мали вищу електропровідність, ніж вихідна каніфоль.

Стало очевидно, що природна каніфоль більше не може бути ні ефективним активатором, ні надійним зв'язуючим у новому, більш високотемпературному діапазоні пайки, який був пов'язаний з переходом на безсвинцеві припої.

Першою спробою вирішити проблему недостатньої активності каніфолі було підсилення її за допомогою потужних активаторів. У якості активаторів почали використовувати галогеніди-іонні сполуки, що містять хлор (Cl) та бром (Br), зазвичай у формі аміних солей. Це привело до появи високоактивних флюсів (RMA – Rosin Mildly Activated, RA – Rosin Activated) які легко прибирали стійкі оксиди та чудово паяли, однак цей підхід був у край небезпечним оскільки галогеніди сприяли електрохімічній міграції. Технічні дослі-

дження від провідних виробників, таких як Kester, у статті "WHY CLEAN A NO-CLEAN FLUX" [6] та більш глибокому дослідженні "REACTIVITY OF NO-CLEAN FLUX RESIDUES" [7], надали вичерпні докази того, що галогенідні іони є каталізаторами електрохімічної міграції (ECM). На відміну від органічних кислот, іони Cl та Br не споживаються повністю під час реакції паяння, вони залишаються на платі у вигляді вільних, надзвичайно мобільних іонів, та завдяки своєму малому розміру та високому заряду, вони є ідеальними носіями струму в гігроскопічному залишку, і саме вони є головним реагентом для росту дендритів, що призводить до коротких замикань.

Усвідомлення цього змусило промисловість високонадійної електроніки (автомобільну, військову, медичну) висунути сувору вимогу "Halide-Free" (без галогенідів) або "Zero-Halogen" (класифікація L0 за J-STD-004). Ця вимога знайшла відображення у комерційних продуктах, як ті, що описані Indium Corporation [8], де "Halogen-Free" стало ключовою маркетинговою та технічною перевагою. Однак питання активності флюсів це було нагальним, оскільки треба було досягти активності галогенідних флюсів не використовуючи самі галогеніди.

Відповіддю стали слабкі органічні кислоти (СОК), також відомі як дикарбонові кислоти. На відміну від абієтинової кислоти, яка має одну карбоксильну групу ( $-COOH$ ), дикарбонові кислоти (наприклад, бурштинова (succinic), глутарова (glutaric) та адипінова (adipic)) мають дві, це забезпечує значно вищу активність при меншій концентрації, яка достатня для безсвинцевих сплавів, але без корозійної агресії галогенідів. Ці сполуки стали основними інгредієнтами активаторів сучасної безвідмивної хімії (класи REL0/ROL0). Однак навіть вони несли в собі ризик: непрореагована дикарбонова кислота – це все ще іонна сполука, здатна поглинати вологу та знижувати SIR [2]. Просто замінити один активатор на інший було недостатньо, потрібно було гарантувати 100% нейтралізацію залишку.

Рішенням стала розробка "розумних" активаторних систем, що працюють за двома різними механізмами:

1) Це розробка активаторів, що зникають. Дослідження, [9], детально вивчило термічну поведінку поширених СОК. Було виявлено, що, наприклад, бурштинова кислота активно розкладається та випаровується при температурах, що досягаються під час піку оплавлення ( $240-250^\circ C$ ). Механізм цього підходу, застосованого в флюсах



з "ультранизьким залишком" (Ultra-Low Residue), є простим: якщо активатор фізично залишає поверхню плати, він не може спричинити відмову надійності, але цей метод має суттєвий ризик в умовах неідеального термопрофілю (наприклад, у "тіні" під BGA), активатор може не досягти температури випаровування, він потрапляє у пастку, залишаючись активним та небезпечним

2) Хімічна пастка, або Ко-полімеризація. Це набагато надійніший і поширеніший підхід, який є серцем сучасної хімії флюсів. Замість того, щоб намагатися випарувати активатор, його хімічно нейтралізують під час самого процесу паяння.

Представником цієї технології є патент IBM [10]. Цей фундаментальний патент описує флюс, що складається не просто з активатора, а з системи: де -1-це дикарбонова кислота та 2- поліол (багатоатомний спирт, який є частиною зв'язуючого). Під час нагрівання в процесі оплавлення відбувається класична хімічна реакція етерифікації:

Кислота (-COOH) + Спирт (-OH) + Тепло → Складний Ефір (-COO-R) + Вода

Сучасний флюс – це реактивна система, будь-яка молекула активатора (кислоти), що не прореагувала з оксидами, знаходить молекулу зв'язуючого (поліолу/смоли) і вступає з нею в реакцію. Мобільний, іонний, небезпечний активатор хімічно "пришивається" до довгого полімерного ланцюга зв'язуючого, він перестає існувати як окрема сполука і стає невід'ємною частиною твердої, стабільної, непровідної та гідрофобної полімерної матриці. Активатор потрапляє у так звану "хімічну пастку".

При використанні безвідмивних флюсів також треба враховувати ще два критичні аспекти:

1. Реологічні властивості флюсу як носія і, як наслідок, паяльної пасти (до складу якої він завжди входить) до процесу паяння.

2. Металургійні та механічні властивості (міцність, опір втомі) самого затверділого паяного з'єднання після паяння.

Для вирішення цих завдань використовують принципово інший підхід: не хімічну, а фізичну модифікацію флюсу шляхом введення до його складу твердих нанодобавок. Наночастинки вводяться у флюс-носії (зв'язуюче) у мікроскопічних концентраціях (зазвичай < 1% ваги), перетворюючи флюс на нанокомпозитну суспензію. Цей наномодифікований флюс потім змішується з порошком припою для створення пасти. Серед усіх кандидатів на роль нанопідсилювачів, найбільшу увагу дослідників привернули алотропні форми вуглецю – вуглецеві нанотрубки (CNT)

та графен (GNP/GNS), це зумовлено їхніми безпрецедентними теоретичними характеристиками: модулем Юнга, що перевищує 1 ТПа, та надзвичайною механічною міцністю. Ідея полягає у створенні "композитного припою" за аналогією із залізобетоном, де відносно м'яка матриця припою посилюється нанорозмірною арматурою (CNT або графеном), однак щоб ця арматура потрапила у з'єднання, вона спочатку повинна бути успішно інтегрована у флюс-носії. Перша і негайна перевага додавання наночастинок у флюс – це покращення його реологічних властивостей. У сучасному виробництві з високою щільністю монтажу, особливо при роботі з BGA та компонентами з малим кроком (fine-pitch), паяльна паста повинна демонструвати складну тіксотропну поведінку. По перше вона має бути достатньо рідкою під тиском, щоб легко проходити крізь мікроскопічні апертури трафарету (printability), а по друге вона має миттєво ставати в'язкою у стані спокою, щоб утримувати чітку форму "цеглини", не розпливаючись і не осідаючи (anti-slump). Осідання (slumping) є критичним дефектом, оскільки воно призводить до утворення перемичок (bridging) – коротких замикань між сусідніми виводами і саме флюс-носії (зв'язуюче) визначає ці реологічні властивості. Додавання вуглецевих нанотрубок або графенових пластин у рідку матрицю флюсу призводить до формування тривимірної перколяційної сітки (3D network), ці наночастинки, утримувані слабкими силами ван дер Ваальса, створюють внутрішній "каркас" усередині рідини. Дослідження, [11], безпосередньо вивчало, як додавання CNT (попередньо диспергованих у флюсі) впливає на властивості фінальної пасти SAC 305. Було виявлено, що ця 3D-сітка CNT у флюсі значно підвищує в'язкість пасти у стані спокою, що забезпечує чудові властивості "anti-slump" (опору осіданню). Водночас, під час руху ракеля (висока швидкість зсуву), ця слабка сітка легко руйнується, в'язкість пасти різко падає (ефект зсувного розрідження), і вона ідеально проходить через трафарет.

Друга, і більш важлива, функція наномодифікованого флюсу – це діяти як система доставки. Під час процесу оплавлення флюс стає рідким, виконує свою хімічну роботу по видаленню оксидів, а потім "звільняє" наночастинки, які він ніс, дозволяючи їм інтегруватися в розплавлену металеву матрицю припою, і як тільки припій твердне, ці наночастинки опиняються вмурованими всередину з'єднання, виконуючи свою головну роль механічного армування.



Армування відбувається двома шляхами:

1. Подрібнення мікроструктури (Grain Refinement) Під час кристалізації (охолодження) розплавленого припою SAC305, він має тенденцію утворювати великі, голчасті кристали або зерна  $\beta$ -Sn (олова). Ці великі зерна роблять структуру крихкою, наночастинки CNT або графенові пластини, що плавають у розплаві, діють як гетерогенні центри нуклеації. Кожна наночастинка стає "зародком", на якому починає рости кристал припою і замість кількох великих зерен, утворюється величезна кількість дрібних. Огляди [12, 13] підтверджують, що додавання вуглецевих нанодобавок призводить до значного подрібнення мікроструктури. Це явище, описане рівнянням Холла-Петча, робить паяне з'єднання одночасно міцнішим і пластичнішим, оскільки дрібні зерна краще чинять опір поширенню тріщин під час термоцикування.

2. Дисперсійне зміцнення (Dispersion Strengthening) Це головний механізм посилення. Надмічні частинки CNT/графену, рівномірно розподілені в м'якій матриці олова ( $\beta$ -Sn), діють як фізичні перешкоди. Огляди [12] та [13] детально описують цей механізм, відомий як "механізм Орована". У металах деформація (згин, розтягнення) відбувається шляхом руху дефектів кристалічної ґратки, що називаються дислокаціями. Коли рухома дислокація зустрічає на своєму шляху надтверду наночастинку, вона не може її "перерізати" і змушена обійти, а цей процес обходу вимагає значно більшої енергії.

Таким чином, мільярди наночастинок, доставлених флюсом, ефективно "закріплюють" дислокації, блокуючи їхній рух. Це безпосередньо підвищує межу плинності (Yield Strength) та межу міцності на розрив (UTS) з'єднання. У огляді [12] показано дослідження, де додавання лише 0.05% ваги графенових нанопластин (GNP) до припою SAC305 призвело до збільшення UTS на 22% та подовження опору втомі (fatigue life) на 27%.

Однак, незважаючи на вражаючі теоретичні переваги, практичне застосування вуглецевих нанодобавок стримується критичною проблемою, що має хімічне підґрунтя: тенденцією часток до агломерації у середовищі флюсу. Як що наночастинки не розподілені в пасті рівномірно (як туман), а натомість злиплися (як град), ефект стає протилежним:

По реологічній складовій : Замість тонкої 3D-сітки, великі агломерати діють як звичайні мікронні частинки, засмічуючи апертури трафарету та погіршуючи якість друку. По механічній – агломерат у фінальному з'єднанні діє як великий

внутрішній дефект та концентратор напружень, з якого починається ріст тріщини. Замість посилення, паяне з'єднання стає крихким [12, 13]. Тому успіх технології залежить від здатності флюсоносія забезпечити ідеальну, стабільну дисперсію наночастинок. Для вирішення цієї проблеми наночастинки необхідно функціоналізувати – модифікувати їхню поверхню, щоб зробити їх хімічно сумісними з флюсом. Як зазначає огляд [13], це може бути хімічна функціоналізація- обробка кислотами для "пришивання" полярних груп, -COOH або -OH, які добре взаємодіють з полярними розчинниками та смолами флюсу.

Але більш ефективним рішенням є металізація наночастинок. Дослідження, [14], є чудовим прикладом цього. Вчені вивчали властивості припою SAC305 з додаванням вуглецевих нанотрубок, попередньо покритих нікелем (Ni-plated CNTs). Це рішення знімає одразу дві проблеми:

1. Проблема дисперсії у флюсі: Металева Ni-покриття "екранує" сили ван дер Ваальса, різко знижуючи тенденцію CNT до агломерації у флюсі.

2. Проблема адгезії у припої: Вуглець має погану змочуваність оловом, що призводить до слабкого зв'язку на межі "матриця-наночастинка". Але нікель (Ni) змочується чудово. Дослідження [15] підтвердило, що Ni-покриття значно покращує змочуваність та забезпечує міцний хімічний зв'язок. Це дозволяє ефективно передавати механічне навантаження з м'якої матриці припою на надміцну нанотрубку.

**Висновки.** Вуглецеві нанодобавки (CNT та графен) є надзвичайно перспективними фізичними модифікаторами. Їх застосування починається у флюсі-носії, де вони спочатку виступають як реологічні модифікатори. Вони створюють 3D-каркас, що кардинально покращує в'язкість флюсу та запобігає осіданню пасти, потім, під час опалення, флюс діє як система доставки, вивільняючи ці наночастинки у розплавлений метал. Там вони діють як механічна арматура, подрібнюючи зерна та блокуючи дислокації, що призводить до значного покращення міцності та опору втомі з'єднання. Проте, успіх цієї технології повністю залежить від здатності хімії флюсу подолати фундаментальну проблему агломерації. Рішення, такі як металізація наночастинок (наприклад, Ni-покриттям [14]), перетворюють флюс на складний носій, що забезпечує не лише хімічну активність, але й ідеальну фізичну дисперсію. Таким чином, флюс еволюціонував до ролі високотехнологічного засобу для створення композитних матеріалів безпосередньо під час процесу паяння.

## Список літератури:

1. Association connecting electronics industries. (2007). *IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL. METHOD 2.6.3.7: Surface Insulation Resistance (SIR)*. URL: [https://www.ipc.org/sites/default/files/test\\_methods\\_docs/2-6-3-7.pdf](https://www.ipc.org/sites/default/files/test_methods_docs/2-6-3-7.pdf)
2. Ray J. Caggiano, Boyd H. Furr, Jeff A. Hatley, Richard Joseph Noreika. *No-clean solder flux providing probe testable residue* (Pat. US6326797B2 / International Business Machines Corporation (IBM); 1999. publ. 26.01.1999) URL: <https://patents.google.com/patent/US6326797B2/en>
3. Cleaning “No-Clean” Flux for Maximum PCBA Reliability. 2024. *Chemtronics*. URL: <https://www.chemtronics.com/cleaning-no-clean-flux-for-maximum-pcba-reliability>
4. Brenda Joyce Nation, Karen Marie Adams, Guilian Gao, Jay Deavis Baker. *Flux formulation* (Pat. EP0710522A1 / European Patent Office ; publ. 08.05.1996). 1996. URL: <https://patents.google.com/patent/EP0710522A1/en>
5. Hélène Conseil, Vadimas Verdingovas, Morten S. Jellesen, Rajan Ambat. Decomposition of no-clean solder flux systems and their effects on the corrosion reliability of electronics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2015. 27(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3712-x>
6. Mike Bixenman, Mark McMeen, Bruno Tolla, Why clean a no-clean flux. *Proceedings of the International Conference on Soldering and Reliability (ICSR) 2016*, published by SMTA. URL: [https://www.kester.com/Portals/0/Documents/Knowledge%20Base/Publications/International%20Conference%20on%20Soldering%20and%20Reliability%20ICSR%202016\\_paper\\_Why%20Clean%20A%20No-Clean%20Flux.pdf?ver=2017-01-26-102146-280](https://www.kester.com/Portals/0/Documents/Knowledge%20Base/Publications/International%20Conference%20on%20Soldering%20and%20Reliability%20ICSR%202016_paper_Why%20Clean%20A%20No-Clean%20Flux.pdf?ver=2017-01-26-102146-280)
7. Tolla B., Jean D., Bhavsar H., Shi Y., Wei X. *Reactivity of No-Clean Flux Residues in Electronic Assemblies: A Systematic Study*. SMTAI. Kester Technical Papers. 2015. URL: <https://www.kester.com/Portals/0/Documents/Knowledge%20Base/Publications/SMTAI-2015-paper-Reactivity-of-no-clean-flux-residues-in-Electronic-Assemblies-a-systematic-study-tolla.pdf>
8. Bastow E. Does Solder Particle Size Impact the Electrical Reliability of a No-Clean Solder Paste Flux Residue? *Indium Corporation. Technical Paper*. 2017. 1–8. URL: [https://www.wnie.online/wp-content/uploads/2018/03/INDI-5889-TPT-Does-Solder-Particle-Size-Impact-Elect-99283-R0\\_low.pdf](https://www.wnie.online/wp-content/uploads/2018/03/INDI-5889-TPT-Does-Solder-Particle-Size-Impact-Elect-99283-R0_low.pdf)
9. Piotrowska K., Li F., Ambat R. Thermal decomposition of binary mixtures of organic activators used in no-clean fluxes and impact on PCBA corrosion reliability. *Soldering & Surface Mount Technology*. 2020. T. 32. № 2. 93–103. DOI: <https://doi.org/10.1108/SSMT-05-2019-0020>
10. Dominic M. Chan, Howard Matrick, Glenn M. Russo. *Soldering flux containing a dicarboxylic acid and a polyol* (Pat. US5250109A / International Business Machines Corporation (IBM). Publ. 05.10.1993). 1993. URL: <https://patents.google.com/patent/US5250109A/en>
11. Javid N. S., Sayyadi R., Khodabakhshi F. Lead-Free Sn-Based/MW-CNTs Nanocomposite Soldering: Effects of Reinforcing Content, Ni-Coating Modification, and Isothermal Ageing Treatment. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. Vol. 30, Issue 5. 4737–4752. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00767-6>
12. Li Y., Wang L., Ma H., Xiong M., Liu L. et al. A Review on the Development of Adding Graphene to Sn-Based Lead-Free Solder. *Metals*, Vol. 13. Issue 7. 1209. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13071209>
13. Li L., Chen Y., Chen H., Guo F., Wei J. et al. Effect of Carbon Nanotubes on the Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Tin-Based Lead-Free Solders: A Review. *Crystals*. 2023. Vol. 13, Issue 5. 789. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13050789>
14. Han Y. D., Jing H. Y., Nai S. M. L., Xu L. Y., Tan C. M., Wei J. Effect of Ni-Coated Carbon Nanotubes on Interfacial Reaction and Shear Strength of Sn-Ag-Cu Solder Joints. *Journal of Electronic Materials*. 2012. Vol. 41, No. 9. 2478–2486. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-012-2142-2>
15. Isaacs P., Munson T. Cleanliness Requirements. A Moving Target. *Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific 2019) Proceedings*. Kauai, Hawaii, USA, 11–14 February 2019. (p. 189–198). DOI: <https://doi.org/10.23919/PanPacific.2019.8696733>

### **Volodymyrov V.V. NANOADDITIVES IN COMPOSITE MATERIALS FOR USE IN RADIOELECTRONIC DEVICES: EFFECTS ON RHEOLOGY, MICROSTRUCTURE, AND RELIABILITY OF ELECTRONIC CONNECTIONS**

*In modern electronics manufacturing, the use of no-clean fluxes—which are functional composites—has become the standard approach as a result of the environmental and economic benefits of eliminating the post-soldering cleaning step. At the same time, thin polymerized flux residues remain on the surface of printed circuit boards throughout their entire life cycle, and under adverse conditions (high humidity, condensation, narrow gaps, high assembly density), they can transform from a passive dielectric into a weak electrolyte, reducing surface insulation resistance and initiating electrochemical migration. Standard SIR test procedures*

(IPC-TM-650 2.6.3.7) show that even in halogen-free systems, the risk of degradation persists due to the presence of ionic reaction products from the activator and the hygroscopicity of the polymer matrix fragments. An additional challenge for no-clean residues is compatibility with in-circuit testing (ICT) and the adhesion of conformal coatings. The article discusses a modern approach to the physical modification of flux by introducing solid nanoadditives (carbon nanotubes and graphene nanosheets) into the binder phase, which transforms the flux into a nanocomposite suspension. It has been shown that such additives are capable of forming a 3D percolation network, thereby increasing the thixotropy of the solder paste and reducing sagging and the risk of bridging during screen printing. It was demonstrated that oxide nanoparticles ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , etc.) can stabilize the flux matrix and modify the viscoelastic properties, improving the printability of pastes and the reproducibility of solder joint geometry. The author found that carbon nanomaterials (graphene, CNTs) predominantly exhibit effects of microstructural “refinement” of  $\beta$ -Sn (tin) and dispersion of intermetallic compounds, which correlates with an increase in the mechanical stability of soldered connections and resistance to degradation during thermal cycling, provided that the dispersion and purity of the nanomaterial are controlled. Unresolved implementation issues have been identified: insufficient standardization of long-term climatic testing protocols for nanomodified residues; limited reproducibility due to agglomeration and sensitivity to dispersion quality; the influence of impurities and the surface chemistry of nanoparticles on the acidity and ionic contamination of the flux; the trade-off between increasing flux activity and maintaining low residual conductivity.

**Keywords:** functional composites, solder paste, nanoadditives, carbon nanotubes, graphene, SIR, electrochemical migration.

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 66.06:544.1  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/32>

**Воробйова В.І.**

<https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Позняк К.О.**

<https://orcid.org/0009-0006-5627-0626>  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Скиба М.І.**

<https://orcid.org/0000-0003-4634-280X>  
Український державний університет науки і технологій

## ДОБІР СКЛАДОВИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГІДРОФОБНИХ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ (V ТИПУ) НА ОСНОВІ КВАНТОВО-ХІМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У роботі проведено квантово-хімічний аналіз реакційної здатності низки природних терпенових сполук та саліцилової кислоти з метою оцінки їх здатності виступати донорами водневого зв'язку при формуванні гідрофобних низькотемпературних евтектичних систем (ГНЕР). На основі розрахованих енергій граничних молекулярних орбіталей ( $E_{\text{ВЗМО}}$  та  $E_{\text{НВМО}}$ ) визначено ключові концептуальні параметри реакційної здатності, зокрема абсолютну електронегативність ( $\chi$ ), хімічну жорсткість ( $\eta$ ), м'якість ( $S$ ) та індекс електрофільності ( $\omega$ ). Показано, що саліцилова кислота характеризується найвищою електронегативністю ( $\chi = 4,92 \text{ eV}$ ), найменшою жорсткістю ( $\eta = 4,52 \text{ eV}$ ) та максимальним індексом електрофільності ( $\omega = 2,68 \text{ eV}$ ), що зумовлює її високу реакційну здатність і схильність до інтенсивного утворення міжмолекулярних водневих зв'язків. Ліналоол демонструє оптимальний баланс електронних параметрів ( $\chi = 4,25 \text{ eV}$ ,  $\eta = 5,15 \text{ eV}$ ,  $S = 0,097 \text{ eV}^{-1}$ ) та наявність стерично доступної гідроксильної групи, що робить його перспективним гідрофобним донором водневого зв'язку для ГНЕР. Ментол і борнеол мають значно вищу жорсткість ( $\eta \approx 6,9\text{--}7,0 \text{ eV}$ ) та нижчу м'якість ( $S \approx 0,072 \text{ eV}^{-1}$ ), що свідчить про обмежену реакційну здатність і меншу ефективність у формуванні сітки водневих зв'язків. Камфора та 1,8-цинеол, незважаючи на помірні значення  $\chi$  та  $\omega$ , не здатні виступати донорами водневого зв'язку через відсутність протонодонорних функціональних груп. Отримані результати підтверджують, що здатність сполук до формування стабільних ГНЕР визначається поєднанням електронних характеристик, хімічної м'якості та структурної доступності донорних груп, що може бути використано для цілеспрямованого дизайну гідрофобних низькотемпературних евтектичних розчинників.

**Ключові слова:** стабільність, молекулярна структура, молекули, квантова хімія, розчинник.

**Постановка проблеми.** Низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР) – це новий клас неводних рідких середовищ, які утворюються шляхом взаємодії двох або більше твердих компонентів через водневі зв'язки, що призводить до значного зниження температури плавлення суміші порівняно з окремими речовинами. На відміну від звичайних евтектичних сумішей, НЕР демонструють відчутні термодинамічні відхилення від

ідеальної рідкої фази, які обумовлені сильними міжмолекулярними взаємодіями, головним чином водневими зв'язками, а також іон-дипольними та ван-дер-Вальсовими силами [1-2]. На сьогодні, НЕР класифікуються за типами від I до V в залежності від природи донорів і акцепторів водневого зв'язку (ДВЗ і АВЗ відповідно). Більшість НЕР I-IV типу є гідрофільними і, відповідно, розчиняються у воді, що значно обмежує їх використання.



В той же час, актуальність створення та використання гідрофобних розчинників, зокрема гідрофобних НЕР, зумовлена необхідністю розв'язання гострих екологічних проблем та впровадження принципів «зеленої хімії» [3–4]. Із розвитком уявлень про низькотемпературні евтектичні розчинники, відносно нещодавно виник окремий тип – (V тип) гідрофобні низькотемпературні евтектичні розчинники (ГНЕР), які набули значного інтересу в контексті екологічно безпечної екстракції неполярних речовин, створення двофазних систем, розробки нових носіїв для фармацевтичних і біотехнологічних застосувань тощо. V тип це неіонні молекулярні сполуки. Це порівняно новий клас розчинників, який повністю складається з молекулярних речовин, що взаємодіють через різницю в кислотності водневих зв'язків (наприклад, між фенольними та аліфатичними гідроксильними групами). Типовим і наразі вивченим складом ГНЕР V типу є суміш тимолу та ментолу. Цікаво, що більшість ГНЕР, які розглядаються в джерелах, належать або до III типу (на основі амонійних солей та жирних кислот, таких як деканова кислота), або до V типу (повністю неіонні суміші на основі терпеноїдів).

Створення гідрофобних варіантів НЕР дозволяє формувати двофазні системи, які ефективно екстрагують забруднювачі (барвники, важкі метали, пестициди) з води, не змішуючись із нею. ГНЕР мають низку суттєвих переваг над іонними рідинами (ІР), що робить їх більш привабливою альтернативою для екстракції та розділення речовин. Основними перевагами є екологічність та біорозкладність. На відміну від багатьох неполярних розчинників, які не є «зеленими», ГНЕР характеризуються низькою токсичністю та високою біорозкладністю. Вони часто виготовляються з природних сполук (наприклад, ментолу, тимолу, жирних кислот), що забезпечує їхню біосумісність. Також ГНЕР, переважно, створюються з дешевої та доступної сировини, що значно знижує загальні витрати на їхнє використання у промислових масштабах. В більшості випадків, синтез ГНЕР є досить простим і полягає у змішуванні та нагріванні компонентів до утворення однорідної рідини. Такий принцип здатен забезпечувати досить високу чистоту кінцевого продукту. Також, через підбір складових для синтезу, можливо більш тонко налаштовувати властивості ГНЕР, зокрема точно регулювати в'язкість, щільність та селективність розчинника для конкретних аналітів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гідрофобні НЕР визначають як «дизайнерські

розчинники», оскільки їхні фізико-хімічні властивості можна легко налаштувати шляхом ретельного підбору компонентів, їхньої структури та молярного співвідношення для відповідності конкретним завданням. За допомогою сучасних методів теоретичного моделювання можна спрогнозувати фізико-хімічні властивості та екстракційну здатність ГНЕР. Дизайнерський підхід дозволяє змінювати ступінь гідрофобності, що є критичним для стабільності системи у воді та їх практичному використанні. Наразі найвідоміші системи ГНЕР на основі тимолу та ментолу, але перелік можливих донорів водневого зв'язку ще не повністю вивчений.

Основними підходами до прогнозування є використання квантово-хімічних розрахунків, що використовується для вивчення електронної структури та реакційної здатності окремих компонентів. А також, карти електростатичного потенціалу, які допомагають візуалізувати розподіл зарядів на поверхні молекул, що дозволяє спрогнозувати можливість утворення електростатичного тяжіння між компонентами розчинника, або між розчинником та аналітом, при моделюванні процесів екстракції. Використання карт електростатичного потенціалу та моделювання густини поверхневого заряду є фундаментальним етапом у прогнозуванні властивостей гідрофобних НЕР, оскільки це дозволяє зрозуміти взаємодію молекул між собою. У створенні гідрофобних розчинників ментол і тимол відіграють ключову роль, проте їхня класифікація як акцепторів чи донорів залежить від компонентів, з якими вони змішуються. Дослідниками в галузі вже доведено, що використання в системах ГНЕР довгих ланцюгів жирних кислот (деканової, олеїнової або лінолевої) як донорів водневого зв'язку (ДВЗ) забезпечує біорозкладність системи при збереженні високої здатності до вилучення органічних сполук. Оскільки ГНЕР є «дизайнерськими розчинниками», донори потрібно ретельно підбирати залежно від цільового об'єкта екстракції та необхідного ступеня гідрофобності. Основними варіантами є жирні кислоти (деканова, олеїнова, лінолева). Їх обирають як донори для посилення гідрофобності та стабільності розчинника у воді. Наприклад, лінолева кислота забезпечує кращу екстракцію фенольних сполук завдяки наявності подвійних зв'язків, що посилюють  $\pi$ – $\pi$  взаємодії. Другим класом сполук є органічні кислоти (щавлева, мурашина, лимонна). Використовуються як донори для ефективного вилучення важких металів (наприклад, свинцю) через їхню здатність

до комплексоутворення. Щавлева кислота часто показує найкращі результати завдяки своїй кислотності та здатності знижувати рН, що сприяє солюбілізації металів.

**Постановка завдання.** З урахуванням вище вказаного, метою роботи є здійснення теоретичного обґрунтування та спрямованого підбору оптимального донора водневого зв'язку для створення гідрофобного НЕР на основі ментолу, або тимолу, використовуючи методи квантово-хімічного моделювання, зокрема для прогнозування реакційної здатності, термодинамічної стабільності та специфічної спорідненості системи до цільових забруднювачів.

**Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень.** Квантово-хімічні розрахунки геометричної оптимізації та електронно-структурних характеристик молекул виконувалися з використанням програмного комплексу HyperChem 8.0 (Hypercube Inc.). Розрахунки проводилися з метою отримання енергій граничних молекулярних орбіталей вищої зайнятої молекулярної орбіталі та нижньої вакантної молекулярної орбіталі (ВЗМО та НВМО відповідно) та подальшого визначення індексів реакційної здатності, що характеризують електродонорні та електронакцепторні властивості молекул. Початкові геометричні моделі молекул створювалися за допомогою вбудованого редактора HyperChem. Структури будувалися у три-вимірному режимі відповідно до хімічної формули з подальшою початковою мінімізацією енергії методом молекулярної механіки ММ+. Оптимізація просторової структури проводилася методом напівемпіричної квантової хімії та методом РМ3, який забезпечує прийнятну точність для органічних молекул та біоактивних сполук.

**Отримані експериментальні результати.** Реакційну здатність досліджуваних сполук щодо їх здатності виступати донорами водневого зв'язку при формуванні гідрофобних низькотемпературних евтектичних систем (ГНЕР) було проаналізовано з урахуванням квантово-хімічних параметрів  $E_{\text{ВЗМО}}$ ,  $E_{\text{НВМО}}$  та енергетичного розриву  $\Delta E$ . Значення  $E_{\text{ВЗМО}}$  є індикатором електродонорної здатності молекул, тоді як величина  $\Delta E$  характеризує їхню хімічну "м'якість" та реакційну здатність, що безпосередньо впливає на ефективність утворення міжмолекулярних водневих зв'язків (Таблиці 1, 2).

Саліцилова кислота характеризується значенням  $E_{\text{ВЗМО}} = -9,44$  eV,  $E_{\text{НВМО}} = -0,41$  eV та відносно малим енергетичним розривом  $\Delta E = 9,04$  eV, що

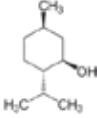
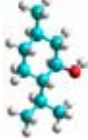
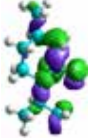
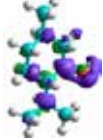
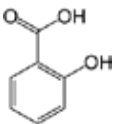
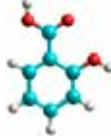
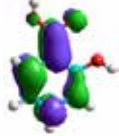
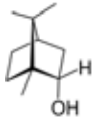
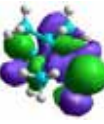
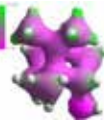
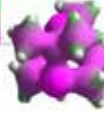
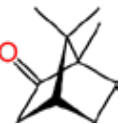
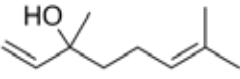
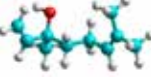
зумовлює її високу схильність до донорства водневого зв'язку. Наявність одночасно карбоксильної та фенольної гідроксильних груп забезпечує ефективне утворення водневих зв'язків, однак можливість внутрішньомолекулярного водневого зв'язування та нижча гідрофобність молекули можуть частково обмежувати її роль у гідрофобних НЕР. Ліналоол має близьке значення  $E_{\text{ВЗМО}} (-9,41$  eV) та помірний  $\Delta E (10,31$  eV), що у поєднанні зі стерично доступною аліфатичною  $-\text{OH}$  групою сприяє ефективному донорству водневого зв'язку при збереженні вираженого гідрофобного характеру молекули. Ментол і борнеол характеризуються значно більш негативними значеннями  $E_{\text{ВЗМО}} (-10,83$  та  $-10,81$  eV відповідно) і великими енергетичними розривами  $\Delta E (13,79$  та  $13,93$  eV), що свідчить про нижчу хімічну м'якість і зменшену реакційну здатність порівняно з ліналоолом і саліциловою кислотою.

Хоча обидві сполуки містять гідроксильні групи, їхня донорна здатність обмежується стеричним екрануванням  $-\text{OH}$  груп у циклічних та біциклічних структурах. Камфора ( $E_{\text{ВЗМО}} = -10,29$  eV,  $E_{\text{НВМО}} = 0,25$  eV,  $\Delta E = 10,53$  eV) та 1,8-цинеол ( $E_{\text{ВЗМО}} = -8,53$  eV,  $E_{\text{НВМО}} = 0,44$  eV,  $\Delta E = 8,96$  eV) не містять протондонорних функціональних груп і тому не можуть виступати донорами водневого зв'язку, незважаючи на відносно сприятливі електронні параметри, зокрема менший  $\Delta E$  у випадку 1,8-цинеолу. Загалом, кількісний аналіз показує, що найбільш ефективними донорами водневого зв'язку серед досліджених сполук є саліцилова кислота ( $\Delta E = 9,04$  eV) та ліналоол ( $\Delta E = 10,31$  eV), тоді як ментол і борнеол демонструють нижчу реакційну здатність через великі значення  $\Delta E (> 13$  eV). Отримані результати свідчать, що оптимальна донорна здатність при формуванні гідрофобних ГНЕР досягається за поєднання помірно високого  $E_{\text{ВЗМО}}$ , відносно малого  $\Delta E$  та наявності стерично доступної протондонорної групи.

Було оцінено здатність обраних природних сполук до переносу електронів на ментол, який розглядався як акцептор водневого зв'язку (AB3), тоді як інші сполуки – саліцилова кислота, борнеол, 1,8-цинеол, камфора та ліналоол – виступали донорами водневого зв'язку (ДВ3) (Таблиця 4). Значення  $\Delta N$ , що характеризує частку переносу електронів між донором і акцептором, були розраховані на основі концептуальних параметрів ( $\chi$  та  $\eta$ ) кожної сполуки. Позитивне  $\Delta N$  свідчить про ефективну передачу електронів від донора до акцептора, а негативне – про обмежену взаємодію.

Таблиця 1

Структура молекул для потенційного виготовлення ГНЕР та 3-вимірна візуалізація розподілу енергій  $E_{ВЗМО}$  та  $E_{НВМО}$ 

| № п/п | Назва              | 2Д-Структура                                                                        | 3Д-Структура                                                                        | $E_{ВЗМО}$                                                                           | $E_{НВМО}$                                                                            | 3Д карти ізоповерхні                                                                  |
|-------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Ментол             |    |    |    |    |    |
| 2     | Саліцилова кислота |    |    |    |    |    |
| 3     | Борнеол            |    |    |    |    |    |
| 4     | 1,8-Цинеол         |   |   |   |   |   |
| 5     | Камфора            |  |  |  |  |  |
| 6     | Ліналоол           |  |  |  |  |  |

Таблиця 2

Зведені значення показників  $E_{ВЗМО}$  та  $E_{НВМО}$  та енергетичної щільності

| Назва              | $E_{ВЗМО}, \text{eV}$ | $E_{НВМО}, \text{eV}$ | $\Delta E, \text{eV}$ |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Ментол             | -10,83282             | 2,960719              | -13,793539            |
| Саліцилова кислота | -9,442827             | -0,4063438            | -9,0364832            |
| Борнеол            | -10,80974             | 3,122569              | -13,932309            |
| 1,8-Цинеол         | -8,52755              | 0,4361712             | -8,9637212            |
| Камфора            | -10,28554             | 0,2452864             | -10,5308264           |
| Ліналоол           | -9,408798             | 0,8993144             | -10,3081124           |



Таблиця 3

## Індекси реакційної здатності молекул

| Сполука            | $\chi$ , eV | $\eta$ , eV | S, eV <sup>-1</sup> | $\omega$ , eV |
|--------------------|-------------|-------------|---------------------|---------------|
| Ментол             | 3.94        | 6.90        | 0.072               | 1.12          |
| Саліцилова кислота | 4.92        | 4.52        | 0.111               | 2.68          |
| Борнеол            | 3.84        | 6.97        | 0.072               | 1.06          |
| 1,8-Цинеол         | 4.05        | 4.48        | 0.112               | 1.83          |
| Камфора            | 5.02        | 5.27        | 0.095               | 2.39          |
| Ліналоол           | 4.25        | 5.15        | 0.097               | 1.76          |

Найвищі значення  $\Delta N$  спостерігалися для саліцилової кислоти та камфори (0,0437 та 0,0444 відповідно), що вказує на сильне донорство електронів та сприятливе утворення водневого зв'язку з ментолом. Ліналоол ( $\Delta N = 0,0129$ ) та 1,8-цинеол ( $\Delta N = 0,0049$ ) демонструють помірну передачу електронів, що забезпечує слабший, але помітний внесок у формування сітки водневих зв'язків. Борнеол показав дещо негативне  $\Delta N$  ( $-0,0036$ ), що свідчить про мінімальний перенос електронів і слабку взаємодію з ментолом. Отримані результати демонструють, що ефективність утворення водневих зв'язків у гідрофобних низькотемпературних евтектичних системах значною мірою визначається електронними властивостями донорних молекул, при цьому саліцилова кислота та камфора є найефективнішими донорами щодо ментолу.

Таблиця 4

**Результати розрахунку індексу переносу електронів  $\Delta N$  при теоретичному моделюванні взаємодії сполук-донорів водневого зв'язку із ментолом, як акцептором водневого зв'язку**

| Сполука            | $\Delta N$ |
|--------------------|------------|
| Саліцилова кислота | 0.0437     |
| Борнеол            | -0.0036    |
| 1,8-Цинеол         | 0.0049     |
| Камфора            | 0.0444     |
| Ліналоол           | 0.0129     |

**Висновки.** Було проведено квантово-хімічний аналіз шести природних сполук (ментол, саліцилова кислота, борнеол, 1,8-цинеол, камфора та ліналоол) з метою оцінки їх здатності виступати донорами водневого зв'язку при формуванні гідрофобних низькотемпературних евтектичних розчинників (ГНЕР).

На основі розрахованих енергій  $E_{\text{ВЗМО}}$  та  $E_{\text{НВМО}}$  визначено ключові концептуальні індекси реак-

ційної здатності: абсолютну електронегативність ( $\chi$ ), жорсткість молекули ( $\eta$ ), м'якість (S) та індекс електрофільності ( $\omega$ ). Саліцилова кислота має найвищу електронегативність ( $\chi = 4,92$  eV), найменшу жорсткість ( $\eta = 4,52$  eV) і максимальний індекс електрофільності ( $\omega = 2,68$  eV), що свідчить про її високу реакційну здатність і здатність ефективно формувати водневі зв'язки.

Ліналоол показав помірні значення  $\chi$ ,  $\eta$  та S, а також наявність стерично доступної гідроксильної групи, що забезпечує ефективну роль донора водневого зв'язку у складі ГНЕР. Ментол і борнеол мають вищі значення жорсткості ( $\eta \approx 6,9\text{--}7,0$  eV) і низьку м'якість ( $S \approx 0,072$  eV<sup>-1</sup>), що обмежує їхню донорну здатність. Камфора і 1,8-цинеол, незважаючи на відносно високі  $\chi$  та  $\omega$ , не можуть виступати донорами водневого зв'язку через відсутність протонодонорних груп.

Розрахунок індексу переносу електронів  $\Delta N$  показав, що при взаємодії з ментолом як акцептором найефективнішими донорами є саліцилова кислота ( $\Delta N = 0,0437$ ) і камфора ( $\Delta N = 0,0444$ ). Ліналоол і 1,8-цинеол демонструють помірну передачу електронів ( $\Delta N = 0,0129$  і  $0,0049$ ), а борнеол практично не взаємодіє з ментолом ( $\Delta N = -0,0036$ ).

Загалом, ефективність формування стабільних гідрофобних низькотемпературних евтектичних розчинників визначається поєднанням електронних властивостей, хімічної м'якості та структурної доступності донорних груп. Саліцилова кислота та камфора виділяються як найбільш перспективні ГНЕР щодо ментолу, тоді як інші сполуки відіграють допоміжну роль у формуванні сітки водневих зв'язків.

**Джерела фінансування.** Ця робота виконана в рамках гранту НФДУ «Передова наука в Україні 2026-2028» [грант № 2025.07/0078].

## Список літератури:

1. Kang Y., Si Y., Jin Q., Xu R., Zhong Y., Wang Y., Fu Y., Gu J., Ye M., Wang S. Hydrophobic magnetic deep eutectic solvents: An all-in-one platform for fast visualization, removal, recycle and degradation of anionic dyes. *Analytica Chimica Acta*. 2025. № 1379. С. 344725.

2. Xu K., Xu P., Wang Y. Aqueous biphasic systems formed by hydrophilic and hydrophobic deep eutectic solvents for the partitioning of dyes. *Talanta*. 2020. № 213. C. 120839.
3. Chen K., Dong H., Ni Z., Zhao Y., Qian Y., Wang Y., Xu K. Selective extraction of anionic and cationic dyes using tailored hydrophobic deep eutectic solvents. *Talanta*. 2024. № 268. C. 125312.
4. Kaur P., Rajani N., Kumawat P., Singh N., Kushwaha J. P. Performance and mechanism of dye extraction from aqueous solution using synthesized deep eutectic solvents. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018. № 539. C. 85–91.
5. Chen L., Liao S., Yu D., Li L., Mu T., Xue Z. Innovative aryl-based hydrophobic deep eutectic solvent for efficient removal of dyes and nanoplastics. *Separation and Purification Technology*. 2023. № 308. C. 122903.
6. Wang C., Zhou Z., Zhang X., Guo H., Boczkaj G. Metal extraction using deep eutectic solvents for metal recovery and environmental remediation – A review. *Separation and Purification Technology*. 2025. № 364. C. 132533.
7. Majidi E., Bakhshi H. Hydrophobic deep eutectic solvents characterization and performance for efficient removal of heavy metals from aqueous media. *Journal of Water Process Engineering*. 2024. № 57. C. 104680.
8. Sawant N., Alomari N., Aguilar J., Velez M., Lizardo M., Caceres S., Ogando R., Garcia C., Maletta A., Hossen A., Gutierrez A., Springstead J., Aparicio S., Atilhan M. Enhanced water purification with hydrophobic natural deep eutectic solvents focused on phenolic compounds removal. *Journal of Water Process Engineering*. 2024. № 67. C. 106106.
9. Sas O. G., Villar L., Domínguez Á., González B., Macedo E. A. Hydrophobic deep eutectic solvents as extraction agents of nitrophenolic pollutants from aqueous systems. *Environmental Technology & Innovation*. 2022. № 25. C. 102170.
10. Zheng G. K., Mahmad Rozi S. K., Ang Q. Y., Rahamathullah R., Shamsudin S., Mohd Rasdi F. L., Taha M. F., Hussein N. M., Aburub F. Thymol–Menthol-Based Deep Eutectic Solvents for Efficient Rhodamine B Remediation: Molecular Interactions, Economic Feasibility, and Environmental Assessment. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2025. № 236. C. 998.
11. Costa F. S., Moreira L. S., Müller M. O., Gonzalez M. H., Amaral C. D. B. Choline chloride-carboxylic acid deep eutectic solvents for lead extraction from electronic waste: A green approach. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2026. № 49. C. 102300.

#### **Vorobiova V.I., Pozniak K.O., Skyba M.I. SELECTION OF COMPONENTS FOR THE DESIGN OF HYDROPHOBIC LOW-TEMPERATURE DEEP EUTECTIC SOLVENTS (TYPE V) BASED ON QUANTUM-CHEMICAL MODELING**

*Hydrophobic deep eutectic solvents (HDES) are liquid systems formed by combining hydrophobic hydrogen bond donors and acceptors, whose strong intermolecular interactions lead to a significant melting point depression compared to the individual components. This study presents a quantum chemical evaluation of the reactivity of selected natural terpenes and salicylic acid with respect to their ability to act as hydrogen bond donors in the formation of hydrophobic deep eutectic systems (HDES). Frontier molecular orbital energies (EHOMO and ELUMO) were used to calculate key conceptual DFT-parameters, including absolute electronegativity ( $\chi$ ), chemical hardness ( $\eta$ ), softness ( $S$ ), and electrophilicity index ( $\omega$ ). Salicylic acid exhibited the highest electronegativity ( $\chi = 4.92$  eV), the lowest chemical hardness ( $\eta = 4.52$  eV), and the maximum electrophilicity index ( $\omega = 2.68$  eV), indicating high reactivity and a strong tendency to form intermolecular hydrogen bonds. Linalool demonstrated a favorable balance of electronic parameters ( $\chi = 4.25$  eV,  $\eta = 5.15$  eV,  $S = 0.097$  eV<sup>-1</sup>) combined with a sterically accessible hydroxyl group, which supports its effective role as a hydrophobic hydrogen bond donor in HDES. Menthol and borneol were characterized by higher hardness values ( $\eta \approx 6.9$ -7.0 eV) and lower softness ( $S \approx 0.072$  eV<sup>-1</sup>), reflecting reduced chemical softness and limited reactivity due to steric shielding of the hydroxyl group. Camphor and 1,8-cineole, despite moderate values of electronegativity and electrophilicity, cannot act as hydrogen bond donors because of the absence of proton donating functional groups. The obtained results demonstrate that the formation of stable hydrophobic deep eutectic systems is governed not only by the presence of donor functional groups but also by electronic structure, chemical softness, and molecular geometry, providing a theoretical basis for the rational design of HDES.*

**Keywords:** stability, molecular structure, molecules, quantum chemistry, solvent.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 621.357

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/33>**Дундуков П.О.**<https://orcid.org/0009-0002-2187-149X>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ущиповський Д.Ю.**<https://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЛОКАЛЬНЕ ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ОСАДЖЕННЯ МІДНИХ МІКРОРОЗМІРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМОПРОВІДНОГО РИСУНКУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

Дана стаття присвячується дослідженню локального електрохімічного осадження мідних мікрооб'єктів діаметром до 1000 мкм із застосуванням сульфатного та нітратного електролітів. Встановлено, що при локальному електроосадженні з використанням анода розміщеного в діелектричному капілярі з діаметром отвору 771 мкм, піднятому над поверхнею катода на висоту 1 мм, відбувається істотне розсіювання зони осадження міді по поверхні катода, унаслідок чого процес локального електроосадження є малоефективним. Це узгоджується з даними мультифізичного комп'ютерного моделювання і свідчить про те, що для забезпечення прецизійного формування мідних об'єктів діаметром до 1000 мкм необхідно мінімізувати зазор між поверхнею катода та краєм діелектричного корпусу капіляра. Підвищення ефективності осадження зі зростанням робочої густини струму може бути пов'язане зі зменшенням розсіювальної здатності електроліту, що загалом є позитивним чинником, оскільки сприяє підвищенню точності локального електроосадження. Встановлено, що у концентрованому нітратному електроліті швидкість і вихід за струмом є вищими порівняно із сульфатним, що пояснюється більшим вмістом іонів міді та нижчою розсіювальною здатністю середовища. При цьому геометричний профіль отриманих мідних об'єктів у нітратному електроліті є більш наближеним до ідеально прямокутного. Також показано, що в нітратному електроліті формуються компактні осади з більш грубокристалічною структурою порівняно із сульфатним електролітом, що обумовлено відсутністю блискоутворюючих добавок. Використання нітратного електроліту забезпечує отримання компактних мідних об'єктів висотою 140 мкм, при густині струму 20 А/дм<sup>2</sup>, за ефективності осадження, що приблизно на третину перевищує аналогічний показник для сульфатного електроліту.

**Ключові слова:** локальне електрохімічне осадження, приховані мікропереходи, електроліт міднення, ефективність осадження, структура металу.

**Постановка проблеми.** Через постійну потребу в мініатюризації та підвищенні обчислювальних можливостей особливе місце серед них мають саме багатошарові плати друкованого монтажу (БПДМ). Основними перевагами сучасних БПДМ є можливість значно зменшити розміри виробу виготовленого на їх основі, можливість застосування компактних радіоелементів поверхневого монтажу та автоматизації їх встановлення. Використовуючи сучасні технології виробництва можлива інтеграція базових функціональних еле-

ментів (резистори або конденсатори) в структуру плати на етапі виробництва. Визначено, що подібна інтеграція дозволяє покращити електричні характеристики готових виробів та збільшити щільність розташування елементів на друкованій платі [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основним компонентом що робить існування БПДМ можливим є перехідні отвори. Для збільшення густини монтажу, ефективності використання наявного простору та покращення

електричних характеристик друкованих плат використовують перехідні отвори малого діаметру – мікропереходи [2]. Високе співвідношення довжини до діаметру ускладнює процес металізації, але виготовлення подібних металізованих отворів є доволі дослідженою проблемою та має ряд технологічних рішень [3, 4]. Перехідні отвори (мікропереходи) поділяються на 3 типи: наскрізні (проходять через всю товщину готової плати), глухі (виходять на один із зовнішніх шарів але не проходять через всю товщину), закриті (з'єднують 2 або більше внутрішніх шари та не виходять до зовнішніх шарів). Для виготовлення друкованих плат із такими елементами необхідним є залучення методу товстошарового електроосадження із селективним заповненням металом таких отворів [5]. Однак відповідна технологія потребує дуже ретельного контролю складу електроліту і є малопродуктивною. В даній роботі основна увага приділяється перспективам використання адитивної технології – локального електрохімічного осадження, оскільки ця технологія дозволяє отримати вироби в мікромасштабі без використання підтримуючих структур, високих температур та потреби інертної атмосфери або вакууму [6]. Існує декілька видів локального електрохімічного осадження. Зокрема, розрізняють локальне електрохімічне осадження з використанням: незаізолюваного мікроанода [7], капіляру наповненого електролітом, мікрокапіляру [8] та мікрокапіляру з декількома отворами [9], осадження обмеженого меніском електроліту [8], зонда [10]. Поступове зменшення розміру анода дозволяє збільшити точність та якість отримуваних мікроструктур. Було проведено дослідження впливу міжелектродної відстані, діаметру аноду та їх співвідношення на густину струму, а також вплив змінного струму та його параметрів на густину струму та властивості осаду [11, 12]. Також продемонстровано виготовлення стовпчиків з міді з використанням багатостадійного формування з репозиціонуванням на краю стовпчика з різною швидкістю руху мікрокапіляра [13]. Нещодавно було проведено дослідження щодо використання локального електроосадження в більших масштабах та впливу характеристик розчину та відносної швидкості руху електродів [14-15] на точність та якість отриманих елементів.

**Постановка завдання.** З огляду на дані [14] найбільш частий діаметр металізованих отворів друкованих плат становить 1 мм, а для прихованих мікропереходів 0,05...0,1 мм. У аналогічних межах може змінюватись висота відповідних еле-

ментів струмопровідного рисунку, що визначається товщиною діелектричної основи – склотекстоліту або препрегу.

Таким чином метою даної роботи є визначення можливості швидкісного та прецензійного отримання тривимірних мідних об'єктів локальним електрохімічним осадженням із основними параметрами в межах 100...1000 мкм.

**Виклад основного матеріалу.** Методика досліджень. Для проведення дослідів з практичної реалізації локального електроосадження та впливу різних факторів на отримані вироби було зібрано експериментальну установку. В якості джерела постійного струму обрано потенціостат PGStat 500N, з використанням програмного забезпечення для керування, контролю та збереження даних. В якості аноду використано платинову пластинку розміщену всередині капіляра. Струм вимірювався за допомогою спеціального програмного забезпечення та звірявся з міліамперметром зі шкалою в 150 поділок та мінімальним діапазоном 0,75 мА. Капіляр виготовлено з мірної піпетки. За допомогою металографічного мікроскопу MIM-7 обладнаного камерою SIGETA USMOS08000KPB було визначено діаметр отвору капіляру, який склав 771 мкм. Також відповідним приладом оцінювали геометричні параметри отриманих об'єктів. При оцінюванні швидкості електрохімічного осадження міді, густину струму розраховували як співвідношення між накладеною силою струму та площею перерізу отвору діелектричного капіляру, у якому знаходився допоміжний електрод-анод.

Основною частиною установки слугував корпус з рухомою платформою, рух можливий за двома осями (X та Y), діапазон руху 10 мм. Для встановлення висоти капіляра використовували мікрогвинт (вісь Z) з вимірювальною шкалою, ціна поділки 0,5мм. На рухомій платформі встановлювали робочу ванну. На дні ванни розміщували мідну пластину-катод, струм до якої підводиться знизу. На рис. 1 зображено схему експериментальної установки для проведення дослідів з локального електроосадження.

Для дослідження було використано два електроліти міднення сульфатний [15, 16] та концентрований нітратний. Сульфатний електроліт містив:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – 220 г/л;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 32 мл/л;  $\text{HCl}$  – 0,2 мл/л; блискоутворюючі добавки (Рубін T200-A – 2 мл/л, Рубін T200 – G – 8 мл/л, Рубін T200-E – 2 мл/л). Нітратний концентрований електроліт містив:  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  – 500 г/л;  $\text{HNO}_3$  – до pH1...2.

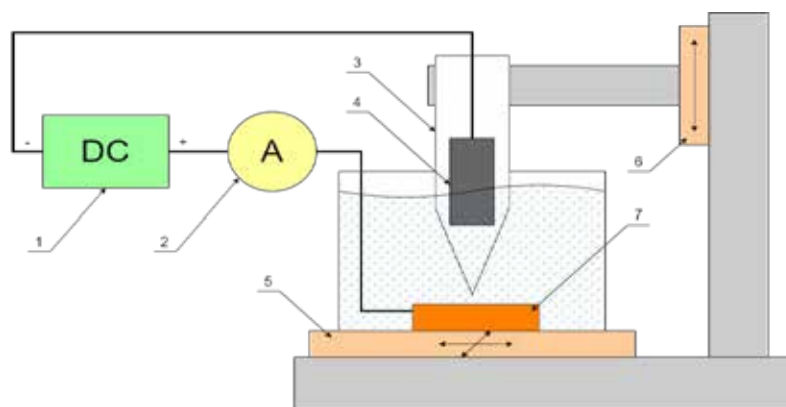


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – потенціостат; 2 – міліамперметр; 3 – скляний капіляр; 4 – анод з платинованого титану; 5 – рухома платформа; 6 – мікрогвинт; 7 – мідна пластина-катод

Перед проведенням практичної частини досліджень було здійснено математичне моделювання за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics, за умов наближених до практичних. Для цього були використані модельні дані для сульфатного електроліту, що приведені у [15, 16]. Було проведено моделювання профілю росту осаду та вторинного розподілу струму в міжелектродному просторі за таких умов: діаметр капіляру – 1 мм; відстані від краю капіляра до поверхні катода – 20, 100 та 1000 мкм, яким відповідали модельні значення напруги 0,49 В, 0,57 В, та 1,5 В відповідно; нахил поляризаційної кривої становив 1100 мА/см<sup>2</sup>/В; провідність досліджуваного сульфатного електроліту міднення складала 0,231 См/см. Умовою зупинки розрахунків було досягнення осадом висоти в 100 мкм. Оцінювання модельної ширини області осадження металу здійснювали в межах висоти профілю осаду, що була більшою за 10 мкм. Графіки вторинного розподілу густини струму та профілі тривалого росту осаду міді наведено на рис. 2.

З рис. 2 видно, що при збільшенні відстані між капіляром та основою від 20 до 1000 мкм відбувається майже більш ніж п'ятиразове розширення області осадження. Хоча у роботах [17, 18] показана можливість досить високоточного локального електроосадження мідного об'єкта при використанні капіляра з діаметром отвору 4 мм та відстанню між краєм діелектричного капіляру та поверхнею основи катода 1000 мкм. Таким чином, для прецизійного електроосадження об'єктів (рис. 2 в) із діаметром 1000 мкм і менше необхідно, щоб зазор між поверхнею катода та краєм діелектричного корпусу капіляру був мінімальним або майже відсутнім.

При спробах локального електроосадження з піднятим над поверхнею катода основи капі-

ляром (відстань від краю капіляру до поверхні катода становила 1000 мкм) спостерігається значне розширення області осадження металу по поверхні катода основи, а локальне електроосадження відбувається дуже повільно і не призводить до утворення явно вираженої тривимірної структури (рис. 3). Це є характерним для обох досліджуваних електролітів, як сульфатного, так і концентрованого нітратного, а також збігається із результатом моделювання приведеного на рис. 2.

На наступному етапі досліджень було здійснено локальне електрохімічне осадження за умови, що діелектричний капіляр, у якому знаходився анод, торкався поверхні катода, тобто зазор був умовно відсутнім. З сульфатного електроліту вдалося отримати об'єкти із компактною структурою та блискучою поверхнею за густини струму до 20 А/дм<sup>2</sup>, при збільшенні густини струму до 30 А/дм<sup>2</sup> спостерігається утворення дендритів. Зображення отриманих з сульфатного електроліту об'єктів із розрахунковою висотою 200 мкм та 400 мкм наведено на рис. 4.

З нітратного електроліту отримано об'єкти з компактною, але більш грубокристалічною, ніж в сульфатному електроліті структурою (рис. 5). Це пояснюється відсутністю блискоутворюючих добавок у нітратному електроліті. Найбільш дрібнокристалічні осади було отримано за густини струму до 30 А/дм<sup>2</sup>. Проте, навіть при збільшенні густини струму до 60 А/дм<sup>2</sup> осад є монолітним і щільним не дивлячись на формування сферолітів.

З метою більш детального вивчення особливостей процесу локального електроосадження, для отриманих мідних об'єктів було визначено ряд основних параметрів: максимальну висоту, швидкість електроосадження, ефективність електроосадження як співвідношення між реальною

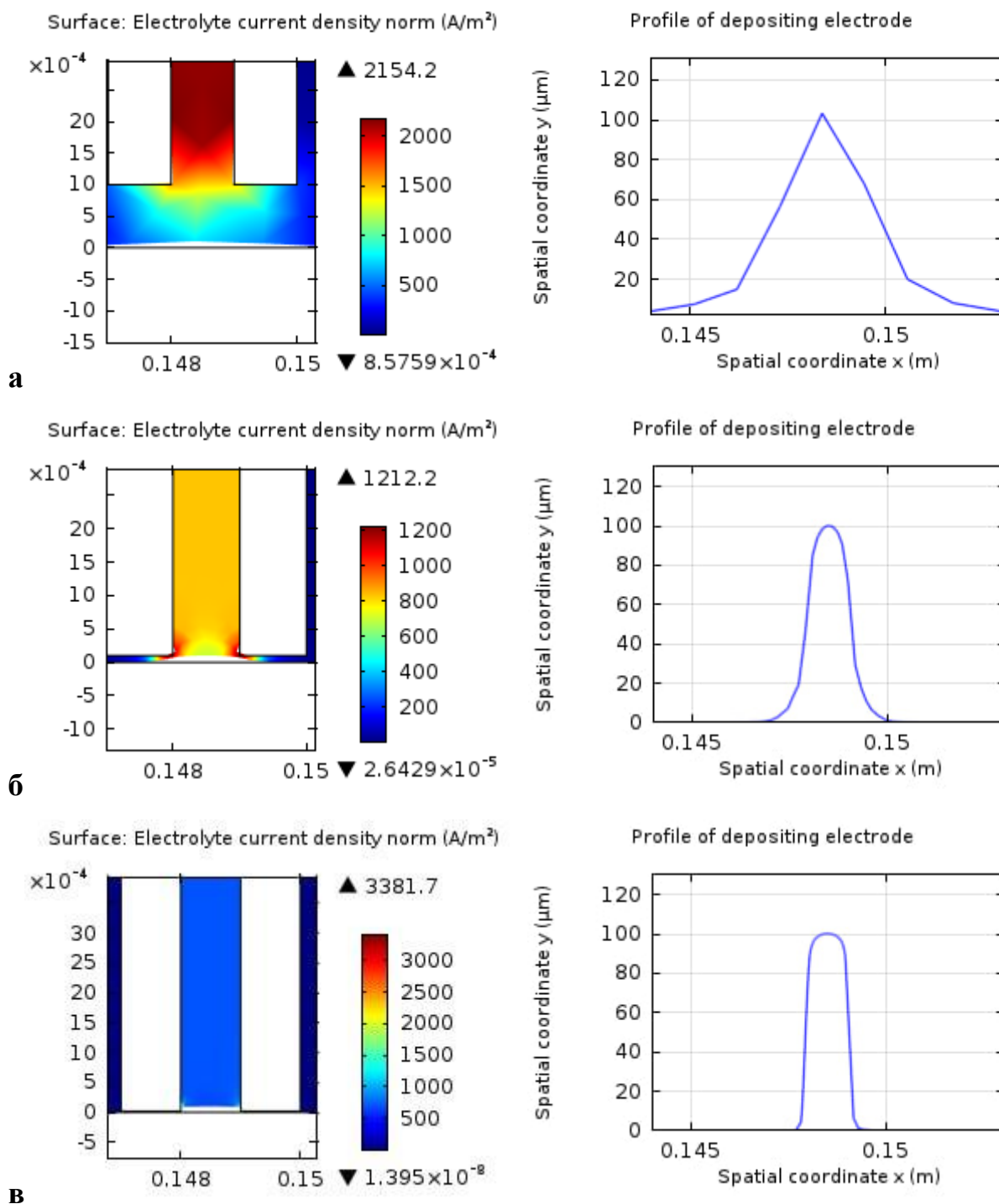


Рис. 2. Графіки вторинного розподілення густини струму та профілів росту осаду міді, при різних значеннях відстані між капіляром та основою (а – 1000 мкм, б – 100 мкм, в – 20 мкм)

та теоретичною розрахунковою висотою об'єктів у відсотках. Відповідні параметри приведені у таблиці 1.

З огляду на результати досліджень, приведених на рис. 4,5 та таблиці 1 можна підсумувати наступне. Форма отриманих об'єктів відрізняється від ідеальної циліндричної. Це може бути у першу чергу наслідком конструктивних

особливостей скляного капіляра, яким обмежували область осадження, як було встановлено кінчик капіляру мав заокруглення з радіусом до 100 мкм. Це спричиняло розширення робочої зони осадження та розповсюдження осадження металу у відповідній зоні міжелектродного простору, як наслідок відбувалось зниження максимальної висоти та ефективності осадження.





Рис. 3. Фотозображення мідних осадів локально електроосаджених в сульфатному електроліті за час 45 хв з піднятим капіляром діаметром 771 мкм, при густинах струму ( $A/дм^2$ ): а – 10; б – 30

З іншого боку, зростання ефективності осадження із збільшенням використовуваної густини струму може вказувати на відповідне зниження розсіювальної здатності, що загалом є позитивним фактором через підвищення локалізації та прецизійності процесу локального електроосадження. Крім цього, утворення грубокристалічної структури осаду в нітратному електроліті також вносило деяку похибку при

визначенні сумарної висоти та ефективності електроосадження. Очікувано, в концентрованому нітратному електроліті швидкість та ефективність осадження є вищою, через більший вміст металу та меншу розсіювальну здатність електроліту. При цьому в нітратному електроліті профіль об'єктів більше наближається до ідеального прямокутного ніж для зразків отриманих в сульфатному електроліті.

**Висновки.** В ході проведених досліджень здійснено локальне електрохімічне осадження мідних об'єктів діаметром до 1000 мкм із використанням сульфатного та нітратного електролітів.

Встановлено, що використання нітратного електроліту дозволяє отримати компактні мідні об'єкти висотою близько 140 мкм за швидкості осадження, що на 30% перевищує відповідний параметр для сульфатного електроліту. Сульфатний електроліт, із наявним комплексом блискоутворюючих добавок, дозволяє отримувати об'єкти із гладкою блискучою поверхнею, у той же час в нітратному електроліті формується досить крупнокристалічна проте компактна і щільна структура осаду металу.

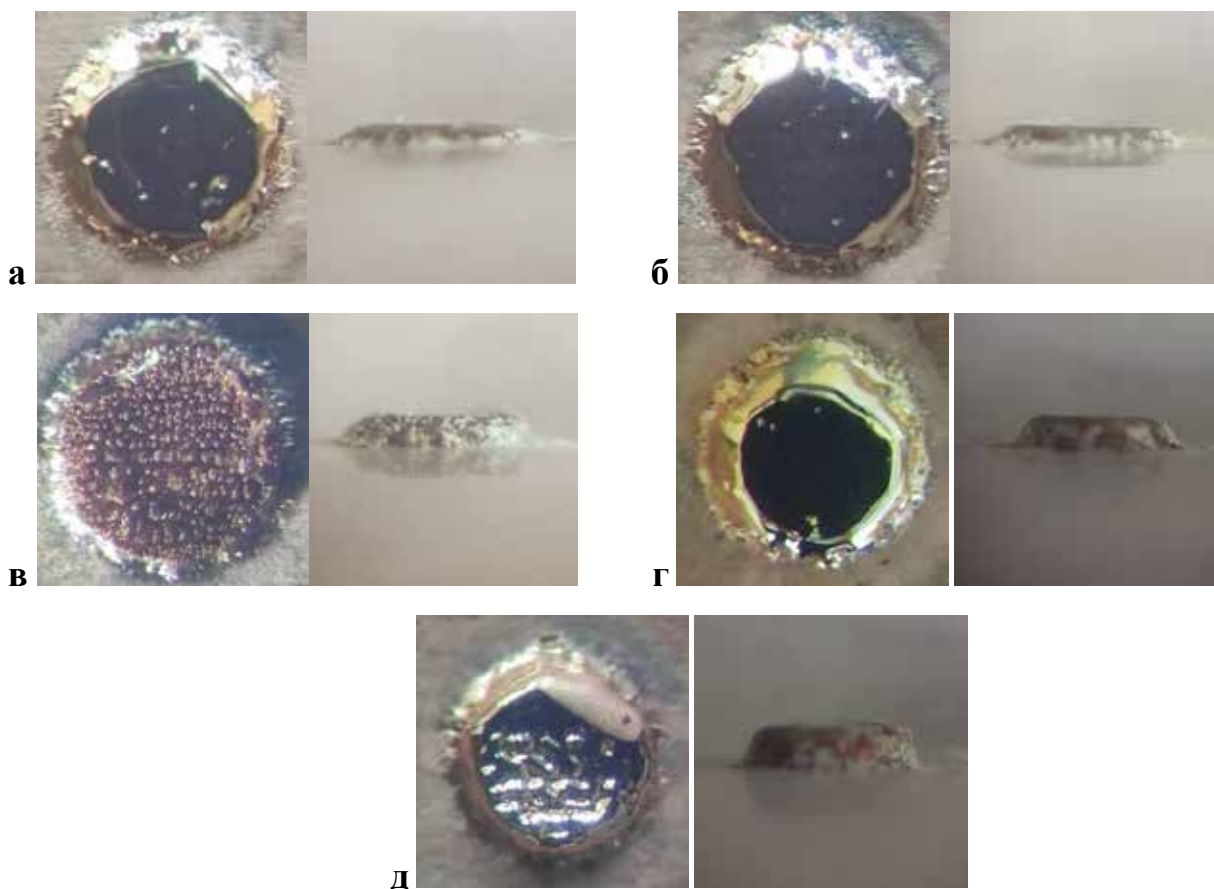


Рис. 4. Електрохімічно сформовані у сульфатному електроліті мідні об'єкти. Густина струму,  $A/дм^2$ : а, г – 15; б, д – 20; в – 30. Розрахункова висота, мкм: а, б, в – 200; г, д – 400



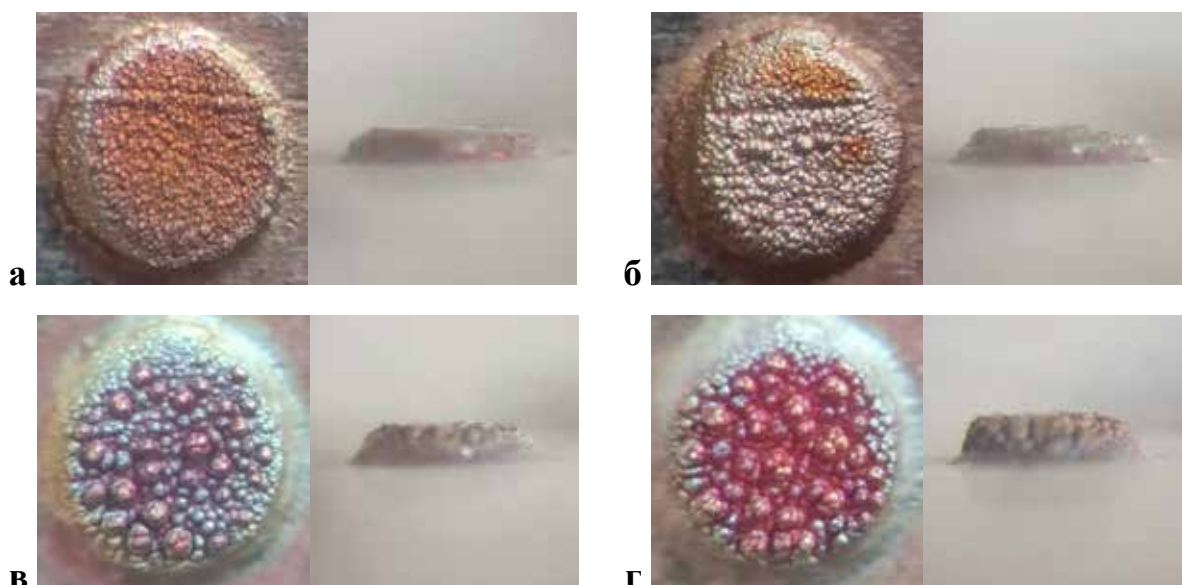


Рис. 5. Електрохімічно сформовані у сульфатному електроліті мідні об'єкти. Густина струму, А/дм<sup>2</sup>: а – 20; б – 30; в – 45; г – 60. Розрахункова висота – 200 мкм

Таблиця 1

## Умови локального електроосадження мідних об'єктів

| Розчин електроліту | Розрахункова густина струму, А/дм <sup>2</sup> | Розрахункова висота об'єкта, мкм | Максимальна визначена висота об'єкта, мкм | Ефективність електроосадження, % | Швидкість електроосадження, мкм/год |
|--------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Сульфатний         | 10                                             | 200                              | 40                                        | 20                               | 26,7                                |
|                    | 15                                             |                                  | 95                                        | 47,5                             | 95                                  |
|                    | 20                                             |                                  | 95                                        | 47,5                             | 126,7                               |
|                    | 30                                             |                                  | 140                                       | 70                               | 276                                 |
|                    | 15                                             | 400                              | 175                                       | 44                               | 86,5                                |
|                    | 20                                             |                                  | 230                                       | 57,5                             | 153,3                               |
| Нітратний          | 10                                             | 200                              | 120                                       | 60                               | 80                                  |
|                    | 15                                             |                                  | 130                                       | 65                               | 131                                 |
|                    | 20                                             |                                  | 145                                       | 72,5                             | 192                                 |
|                    | 30                                             |                                  | 150                                       | 75                               | 304                                 |
|                    | 45                                             |                                  | 180                                       | 90                               | 534                                 |
|                    | 60                                             |                                  | 200                                       | 100                              | 820                                 |

## Список літератури:

1. Lee H. F., Chan C. Y., Tang C. S. Embedding capacitors and resistors into printed circuit boards using a sequential lamination technique. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 207. № 1-3. P. 72–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.051>
2. Jones D. L. PCB design tutorial. 2004, P 3-25. URL: [https://d1.amobbs.com/bbs\\_upload782111/files\\_12/ourdev\\_422724.pdf](https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_12/ourdev_422724.pdf)
3. Reid J. Copper electrodeposition: principles and recent progress. *Japanese journal of applied physics*. 2001. Vol. 40. № 4S. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.40.2650>
4. Kou S. C., Hung A. Plating of small blind vias [multilayer PCBs]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. 1999. Vol. 22. № 3. P. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.1109/6104.795855>
5. Яцюк Л. А., Косогін О. В., Ушаповський Д. Ю., Лінючева О. В., Фатєєв Ю. Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу, 2018. 330 с.
6. Sundaram M. M., Kamaraj A. B., Kumar V. S. Mask-less electrochemical additive manufacturing: a feasibility study. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015. Vol. 137. № 2. P. 021006. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029022>

7. El-Giar E. M., Said R. A., Bridges G. E., Thomson D. J. Localized electrochemical deposition of copper microstructures. *Journal of the Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147. № 2. P. 586. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1393237>
8. Hu J. Interfacial physics in meniscus-confined electrodeposition and its applications for fabricating electronic structures: Doctoral dissertation; University of Illinois at Urbana-Champaign. 2011. P. 117.
9. McKelvey K., O'Connell M. A., Unwin P. R. Meniscus confined fabrication of multidimensional conducting polymer nanostructures with scanning electrochemical cell microscopy (SECCM). *Chemical Communications*. 2013. Vol. 49. № 29. P. 2986–2988. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3CC00104K>
10. Hirt L., Ihle S., Pan Z., Dorwling-Carter L., Reiser A., Wheeler J. M., Zambelli T. Template-Free 3D Microprinting of Metals Using a Force-Controlled Nanopipette for Layer-by-Layer Electrodeposition. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.). 2016. Vol. 28. № 12. P. 2311–2315. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201504967>
11. Kamaraj A. B., Sundaram M. A study on the effect of inter-electrode gap and pulse voltage on current density in electrochemical additive manufacturing. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 48. № 4. P. 463–469. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10800-018-1177-3>
12. Behroozfar A., Daryadel S., Morsali S. R., Moreno S., Baniasadi M., Bernal R. A., Minary-Jolandan M. Microscale 3D printing of nanotwinned copper. *Advanced materials*. 2018. Vol. 30. № 4. P. 1705107. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201705107>
13. Nakazawa K., Yoshioka M., Mizutani Y., Ushiki T., Iwata F. Local electroplating deposition for free-standing micropillars using a bias-modulated scanning ion conductance microscope. *Microsystem Technologies*. 2020. Vol. 26. № 4. P. 1333–1342. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04665-z>
14. Standard Size of PCB Vias. 2024. URL: <https://www.pcbx.com/article/Standard-Size-of-PCB-Vias>
15. Vasyliiev G., Vorobyova V., Ushchapovskiy D., Kotyk M., Linyucheva O. Influence of polarization curve slope on the accuracy of local copper electrodeposition from sulphate electrolyte. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2023. Vol. 13. № 6. P. 971–980. DOI: <https://doi.org/10.5599/jese.1899>
16. Babchuk R., Ushchapovskiy D., Vorobyova V., Linyucheva O., Kotyk M., Vasyliiev G. Additive concentration and nozzle moving speed influence on local copper deposition for electrochemical 3D-printing. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2024. Vol. 14. № 2. P. 265–273. DOI: <https://doi.org/10.5599/jese.2291>
17. Ushchapovskiy D., Vorobyova V., Plivak O., Motronyuk T., Vasyliiev G. Limitations of copper nitrate electrolyte for fast electrochemical 3d-printing. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. 2022. Vol. 27. № 4. P. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2022.265832>
18. Vasyliiev G., Vorobyova V., Ushchapovskiy D., Linucheva O. Local electrochemical deposition of copper from sulfate solution. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2022. Vol. 12. № 3. P. 557–563. DOI: <https://doi.org/10.5599/jese.1352>

#### **Dundukov P.O., Ushchapovskiy D.Yu. LOCAL ELECTROCHEMICAL DEPOSITION OF COPPER MICRO-SIZED ELEMENTS OF THE PRINTED BOARD PATTERNS**

*This article is devoted to the study of local electrochemical deposition of copper microobjects with a diameter of up to 1000  $\mu\text{m}$  using sulfate and nitrate electrolytes. It has been established that during local electrodeposition, there is a significant scattering of the copper deposition zone over the cathode surface, as a result of which the local electrodeposition process is very inefficient, provided that the anode is placed in a dielectric capillary with a hole diameter of 771  $\mu\text{m}$ , raised above the cathode surface to a height of 1 mm. This is consistent with multiphysics computer modeling data and indicates that to ensure precision electrodeposition of copper objects with a diameter of up to 1000  $\mu\text{m}$ , it is necessary to minimize the gap between the cathode surface and the edge of the dielectric. It has been shown that the increase in deposition efficiency with increasing operating current density may be associated with a decrease in the electrolyte's throwing power, which is generally a positive factor, since it contributes to increasing the accuracy of local electrodeposition. It was found that in concentrated nitrate electrolyte the velocity and deposition efficiency are higher compared to sulfate, which is explained by the higher content of copper ions and lower electrolyte throwing power. At the same time, the geometric profile of the obtained copper objects in nitrate electrolyte is closer to perfectly rectangular. It was also found that compact deposits with a coarser crystalline structure are formed in nitrate electrolyte compared to sulfate electrolyte, which is due to the absence of the brightener additives. The nitrate electrolyte under study provides electrodeposition of compact copper objects with a height of 140  $\mu\text{m}$ , at a current density of 20 A/dm<sup>2</sup>, with a deposition efficiency that is approximately one third higher than the similar indicator for the sulfate electrolyte.*

**Keywords:** local electrochemical deposition, hidden microjunctions, copper plating electrolyte, deposition efficiency, metal structure.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Єфімова В.Г.**

<https://orcid.org/0000-0003-2372-8398>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пилипенко Т.М.**

<https://orcid.org/0000-0003-1454-2882>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Семенець Ю.В.**

<https://orcid.org/0009-0001-6958-0766>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМЕТИЧНИХ ЕМУЛЬСІЙ, ЩО СТАБІЛІЗОВАНІ СУМІШШЮ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

*У роботі показано, що основою багатьох видів косметичної продукції є емульсії, у якості стабілізатора яких використовуються поверхнево-активні речовини як природного так і синтетичного походження.*

*Визначено, що проблемою всіх емульсійних композицій є їх термодинамічна та седиментаційна нестійкість.*

*Висвітлено, що для стабілізації емульсій різного призначення широко використовують композиції поверхнево-активних речовин різної чи однакової природи, що призводить до зростання поверхневої активності за рахунок утворення змішаних міцел.*

*Показано, що на теперішній час у виробництво косметичних емульсій є тенденція використання суміші емульгаторів різної природи, тому дослідження фізико-хімічних властивостей таких систем є актуальною задачею, що значно спрощує процедуру розробки композицій.*

*Показано, що метою даного дослідження було визначення поверхневого натягу системи, яка утворена сумішшю емульгаторів, критичну концентрацію міцелоутворення, седиментаційну стійкість та колоїдну стабільність.*

*У дослідженнях визначено параметри адсорбційних шарів сумішей поверхнево-активних речовин різної природи. Встановлено величину максимальної адсорбції на кордоні з толуолом і товщину насиченого адсорбційного шару суміші неіоногенної поверхнево – активної речовини. Показано, що на міжфазній поверхні вона зростає у порівнянні з аналогічною величиною на межі поділу фаз розчин-повітря, що свідчить про збільшення гідратного шару навколо крапель олії.*

*Визначено розмір міжфазного натягу на межі поділу фаз поверхнево-активна речовина – повітря. Показано, що його значення знижується до 15 мН/м, що сприяє підвищенню стабільності емульсій.*

*Встановлено оптимальний вміст емульгатора на рівні 4% для суміші іонних та неіоногенних поверхнево-активних речовин та 7% для суміші неіоногенних поверхнево-активних речовин.*

*Визначено, що композиції, які стабілізовано комбінацією аніонних поверхнево-активних речовин та неіоногенних поверхнево-активних речовин є мікрогетерогенними системами із середнім діаметром крапель 1,0–5,0 мкм в залежності від вмісту поверхнево-активної речовини.*

*Показано, що для суміші неіоногенних поверхнево – активних речовин лежить в межах від 4,0 до 8,0 мкм з невеликими включеннями розміром від 10,0 до 16,5 мкм.*

*Встановлено, що композиції є псевдопластичними рідинами, що мають межу плинності.*

*Показано порівняння фізико-хімічних характеристик композицій, одержаних у присутності промислових органічних емульгаторів. Дані досліджень свідчать, що кращим комплексом властивостей*

володіють емульсією, які стабілізовані сумішшю іонних та неіонних поверхнево-активних речовин, що забезпечує стійкість за рахунок електростатичного та стеричного факторів стійкості.

**Ключові слова:** емульгатор, критична концентрація міцелоутворення, поверхневий натяг, в'язкість емульсії, адсорбційні шари.

**Постановка проблеми.** Основою багатьох видів косметичної продукції є емульсії, що складаються з двох рідин, які не змішуються між собою. У якості стабілізатора таких систем використовуються поверхнево-активні речовини (ПАР) як природного так і синтетичного походження. Проблемаю всіх емульсійних композицій є їх термодинамічна та седиментаційна нестійкість, що призводить до їхнього руйнування [1-4]. Емульгатори знижують поверхневий натяг системи до 5 мДж/м<sup>2</sup>, швидко адсорбується на краплинах, створюючи тонкий шар, що не змінюється при зіткненні та перешкоджає коалесценції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для стабілізації емульсій різного призначення широко використовують композиції ПАР різної чи однакової природи, маючих при визначеному співвідношенні компонентів синергетичний ефект зниження критичної концентрації міцелоутворення (ККЦ) та зростання поверхневої активності за рахунок утворення змішаних міцел [5]. Адсорбційні шари суміші ПАР на межі поділу фаз масло-вода включають молекули всіх поверхнево-активних компонентів, що забезпечує високу стабільність дисперсних систем [5, 6]. На теперішній час у виробництво косметичних емульсій є тенденція використання суміші емульгаторів різної природи. При цьому відомості о колоїдно-хімічних властивостях комбінованих емульгаторів відсутні. Отже дослідження фізико-хімічних властивостей таких систем є актуальною задачею, що значно спрощує процедуру розробки композицій, що відповідають споживчим властивостям.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження було визначити поверхневий натяг системи, що утворена сумішшю емульгаторів, критичну концентрацію міцелоутворення, седиментаційну стійкість та колоїдну стабільність.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що тип та стійкість емульсій залежать від співвідношення (балансу) гідрофільних та гідрофобних функціональних груп молекул ПАР. Для отримання прямих емульсій необхідно використовувати емульгатори з числами ГЛБ, що дорівнюють 8-13 [2]. За відомим методиками нами було визначено числа ГЛБ суміші емульгаторів. Для суміші неіонних ПАР воно становило 10,5, а для суміші аніонних та неіонних ПАР – 13,5. У якості ПАР з відомим

числом ГЛБ використовували ефір полігліцериду жирних кислот з числом ГЛБ, рівним 4. Виходячи з отриманих даних, у якості неполярної фази було обрано соняшникову рафіновану олію, що має близьке число ГЛБ.

Поверхневий натяг комбінованих стабілізаторів на кордоні водний розчин-газ та водний розчин-толуол, який був обраний як модель неполярної фази було виміряно на цифровому тензіометрі К9. Ізотерми поверхневого натягу сумішей неіоногенної поверхнево-активної речовини та (НПАР) та суміші аніоногенної поверхнево-активної речовини (АПАР) наведено на рис. 1.

З використанням отриманих ізотерм поверхневого натягу визначено значення поверхневої активності, ККМ та розраховано параметри моношарів стабілізаторів [2]. Результати досліджень представлені у табл. 1.

З наведених даних випливає, що на межі поділу фаз водний розчин-повітря суміш АПАВ та НПАВ має більш високі значення поверхневої активності та максимальної адсорбції та низьке значення ККМ, ніж суміш недисоціюючих у воді неіонних ПАР, що пов'язано з утворенням у розчині змішаних міцел [3]. З наведених даних випливає, що на межі водний розчин-толуол емульгатором з кращими поверхнево-активними властивостями є суміш НПАВ.

Для обчислення температурних коефіцієнтів поверхневого натягу комбінованих стабілізаторів було виміряне значення  $\sigma$  для водних розчинів сумішей ПАР однієї концентрації при різних температурах. Для суміші АПАВ та НПАВ величина  $d\sigma/dT$  становила 0,044 мДж/м<sup>2</sup>, для суміші НПАВ – 0,037 мДж/м<sup>2</sup>. Значення температурного коефіцієнту поверхневого натягу дозволяє прогнозувати поведінку емульгатора при різних температурах та обирати умови змішування фаз.

Оцінку седиментаційної стійкості емульсії проводили за об'ємом розшарування водневої та масляної фаз на протязі 7 днів. Колоїдну стабільність емульсії визначали за стандартною методикою методом центрифугування при частоті обертів 6000 об/хв, з якої випливає, що емульсія вважається стабільною, якщо після центрифугування у пробірці спостерігається виділення не більш ніж однієї краплини водневої фази та/чи не більш 0,5 см шару масляної.

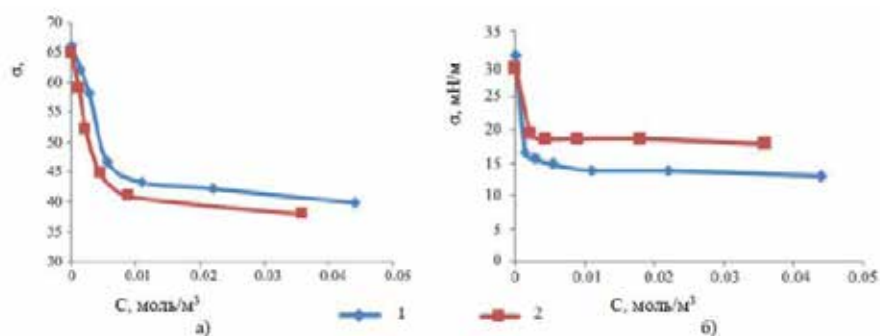


Рис. 1. Ізотерма поверхневого натягу ПАР водних розчинів НПАР (1); АПАР та НПАР (2) на різних границях поділу фаз: а – з повітрям; б – з толуолом

Таблиця 1

**Величини поверхневої активності, критичної концентрації міцелотворення та параметри адсорбційних шарів сумішей ПАР**

| Найменування суміші ПАР                 | Адсорбційні характеристики сумішей ПАР          |                                                   |                                       |                                       |                                        |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
|                                         | $\sigma_{\min} \times 10^3$ , Дж/м <sup>2</sup> | $\Gamma_{\max} \times 10^6$ , моль/м <sup>2</sup> | $S_0 \times 10^{19}$ , м <sup>2</sup> | $\delta \times 10^9$ , м <sup>2</sup> | $C_{\text{ККМ}}$ , моль/м <sup>3</sup> |
| межа поділу фаз водний розчин – повітря |                                                 |                                                   |                                       |                                       |                                        |
| Суміш АПАР та НПАР                      | 37,0                                            | 5,1                                               | 3,25                                  | 1,76                                  | 0,0045                                 |
| Суміш НПАР                              | 40,0                                            | 7,8                                               | 2,95                                  | 2,94                                  | 0,0064                                 |
| межа поділу фаз водний розчин – толуол  |                                                 |                                                   |                                       |                                       |                                        |
| Суміш АПАР та НПАР                      | 17,8                                            | 4,6                                               | 3,6                                   | 1,6                                   | 0,0037                                 |
| Суміш НПАР                              | 13,0                                            | 6,8                                               | 2,44                                  | 4,08                                  | 0,0025                                 |

Примітки:  $\sigma_{\min}$  – мінімальний поверхневий натяг;  $\Gamma_{\max}$  – величина максимальної адсорбції;  $S_0$  – площа, що займає одна молекула ПАР у насиченому моношарі;  $\delta$  – товщина адсорбційного шару;  $C_{\text{ККМ}}$  – значення критичної концентрації міцелотворення.

Композиції відрізнялися типом емульгатора та його концентрацією. За отриманими результатами було побудовано гістограми співвідношення емульсії та фаз, що відшарувалися в залежності від концентрації у композиціях, що стабілізовані суміші АПАР та НПАР та суміші НПАР (рис. 2, 3).

Зі зростанням концентрації стабілізатора для всіх зразків кількість стійкої емульсії зростає. Композиції мають високу стабільність при введенні від 3% для емульгатора, який представлено сумішшю АПАР та НПАР та від 5% для суміші НПАР.

При зростанні концентрації стабілізатора, що вводиться показав зростання стійкості для всіх емульсій. Композиції мають високу стабільність при введенні від 3% для емульгатора, що являє собою суміш АПАР та НПАР та від 5% для суміші НПАР.

Дослідження впливу від'ємних температур на стійкість емульсій, що дозволяє визначити стабільність емульсії за низьких температур та передбачити, як буде поводити себе готовий продукт при транспортуванні та несприятливих погодних

умовах. Встановлено, що при перепадах температур втрата стійкості становить 1-2%, що не впливає на споживчі властивості продукту. В результаті проведених досліджень було встановлено:

- Найбільш оптимальний відсоток вводу емульгатора для виготовлення косметичної композиції становить 4 мас.% суміші АПАР та НПАР та 7 мас. % суміші НПАР. Емульсії з такою кількістю стабілізатора будуть достатньо стійкими, витримувати механічне навантаження, не руйнуватися під дією центробіжного поля та від'ємних температур;

- використання стабілізатора, який є сумішшю НПАВ, дозволяє отримати косметичні продукти різного призначення: при введенні 2-3% емульгуючої основи виходить рідка емульсія, яку можна використовувати для приготування косметичного молочка, лосьйонів. Для отримання крему, масою при приготуванні емульсії відсоток введення мас становити від 5 до 7%;

- висока стійкість отриманих емульсій у присутності сумішей АПАР та НПАР обумовлена змішаними факторами стійкості дисперсних систем: наявність у системі іонних ПАР забезпечує



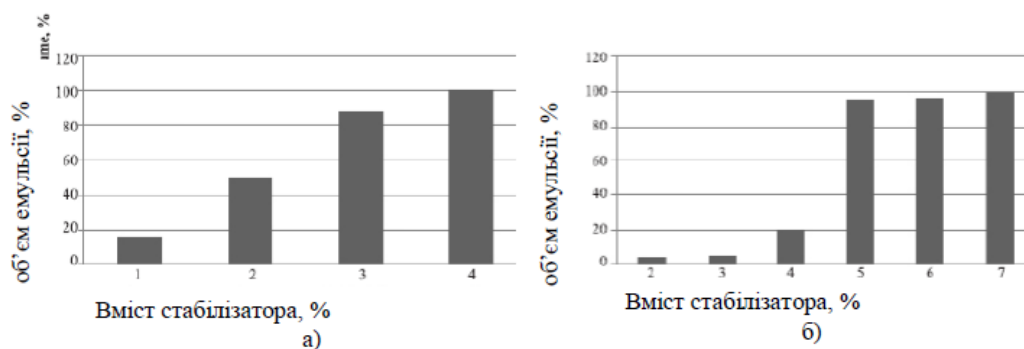


Рис. 2. Вплив концентрації стабілізаторів, що складаються: а) з суміші АПАР та НПАР; б) суміш НПАР.

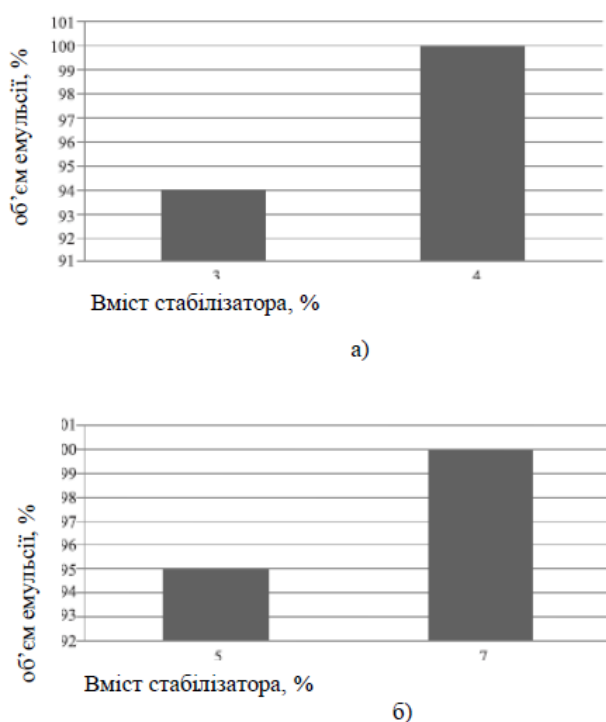


Рис. 3. Вплив концентрації стабілізаторів на стійкість емульсій в процесі центрифугування, що складаються з суміші: а) АПАР та НПАР; б) із суміші НПАР

електростатичну стабілізацію, а присутність неіонного ПАР – стеричну стабілізацію (електростеричну стабілізацію). При використанні комбінованого стабілізатора, являє собою суміш неіонних ПАР, при цьому в системі реалізується лише стеричний фактор стійкості.

Однією з визначальних характеристик емульсійних композицій є розміри частинок дисперсної фази, визначені методом світлової мікроскопії. На рис. 4 представлені диференціальні криві розподілу частинок за розмірами емульсій, одержаних у присутності НПАР. Аналогічні дані отримані для композицій, стабілізованих сумішшю АПАР та НПАР.

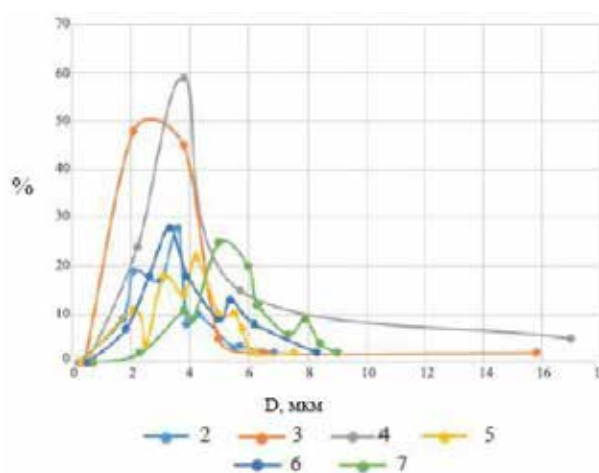


Рис. 4. Розподіл за розмірами краплин емульсій, стабілізованих різними кількостями суміші НПАР (2-7 г на 100 мл композиції)

Наведені дані показують, що отримані емульсії є полідисперсними мікрогетерогенними системами. Діаметри різних фракцій змінюються в межах від 1 до 5 мкм для суміші АПАР та НПАР та від 3,3 до 16,6 мкм для суміші НПАР. Ступінь полідисперсності, що дорівнює відношенню максимального діаметра до найбільш ймовірного діаметру, знаходиться в межах від 1,75 до 4,25.

Реологічні характеристики, що обумовлюють споживчі властивості косметичних композицій (поглинання, розтікання, здатність зволожувати) вимірювали на цифровому ротаційному віскозиметрі «Полімер РПЕ-1М».

Криві течії емульсій, стабілізованих різними кількостями суміші іонних та неіонних ПАР, і залежність в'язкості від напруги зсуву наведено на рис. 5 та 6.

**Висновки.** Аналіз реологічних характеристик прямих концентрованих емульсій показав, що дані композиції є псевдопластичними системами, що мають межу плинності, величина якої залежить від типу та кількості стабілізатора.

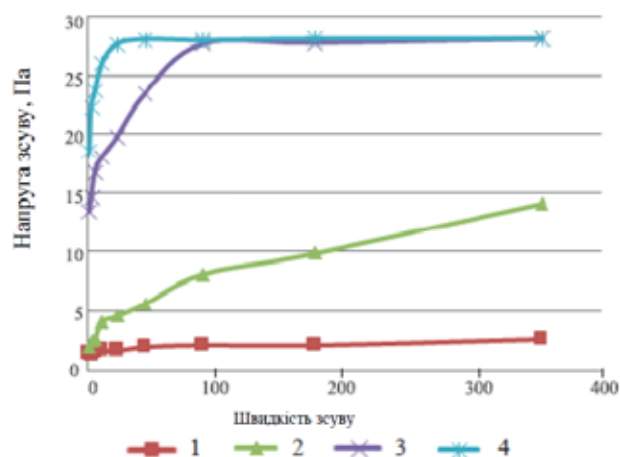


Рис. 5. Криві течії емульсій, що стабілізовані різною кількістю комбінацій АІПАР

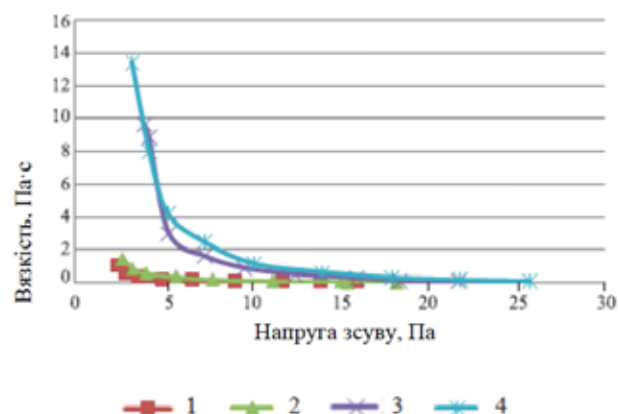


Рис. 6. Вплив вмісту стабілізатора, що складається з суміші АІПАР та НІПАР на в'язкість емульсії

Варіювання вмісту емульгатора дозволяє отримати лінійку косметичних засобів від молочка до кремів різного призначення. Емульсії, отримані з використанням стабілізатора, є я сумішню АІПАР

і НІПАР і утворюють змішані адсорбційні шари, які забезпечують електростатичний та стеричний фактори стійкості, які є найкращими з точки зору структурно-механічних властивостей.

#### Список літератури:

1. Kurrimboccus F., Orchard A., Danckwerts M. P., van Vuuren S. Antimicrobial Formulation of Chrysopogon zizanioides Essential Oil in an Emulsified Lotion for Acne. *Planta Medica* 2021. Vol.88 (13). p. 1256–1262. <https://doi.org/10.1055/a-1699-3284>
2. Sanad R. A., Mabrouk M. I. Development and assessment of stable formulations containing two herbal antimicrobials: *Allium sativum* L. and *Eruca sativa* miller seed oils. 2015. *Drug Development and Industrial Pharmacy*. Vol. 42 (6). p. 958–968. <https://doi.org/10.3109/03639045.2015.1096280>
3. Watanabe T., Kawai T., Nonomura Y. Effects of Fatty Acid Addition to Oil-in-water Emulsions Stabilized with Sucrose Fatty Acid Ester. 2017. *Journal of Oleo Science*. Vol. 67 (3). p. 307–313. <https://doi.org/10.5650/jos.ess17097>
4. Motoyama T., Katsuumi Y., Sasakura H., Nakamura T., Suzuki H., Tsuchiya K. Preparation of Highly Stable Oil-in-Water Emulsions with High Ethanol Content Using Polyglycerol Monofatty Acid Esters as Emulsifiers. 2022. *Journal of Oleo Science*. Vol. 71 (6). p. 829–837. <https://doi.org/10.5650/jos.ess21430>
5. Filipe G., Bigotto B., Baldo C., Gonçalves M., Kobayashi R., Lonni A., Celligoi M. Development of a multifunctional and self-preserving cosmetic formulation using sophorolipids and palmarosa essential oil against acne-causing bacteria. 2022. *J Appl Microbiol*. Vol. 133(3). p. 1534–1542. <https://doi.org/10.1111/jam.15659>
6. Nollet M., Boulghobra H., Calligaro E., Rodier J. An efficient method to determine the Hydrophile-Lipophile Balance of surfactants using the phase inversion temperature deviation of C i E j / n -octane/water emulsions. 2019. *International Journal of Cosmetic Science*. Vol. 41 (2). p. 99–108. <https://doi.org/10.1111/ics.12516>

#### Yefimova V.G., Pilipenko T.M., Semenets Yu.V. RESEARCH OF PHYSICO CHEMICAL CHARACTERISTICS OF COSMETIC EMULSIONS STABILIZED WITH A MIXTURE OF SURFACE ACTIVE SUBSTANCES

*The work shows that the basis of many types of cosmetic products are emulsions, as a stabilizer of which surfactants of both natural and synthetic origin are used. It is determined that the problem of all emulsion compositions is their thermodynamic and sedimentation instability.*

*It is highlighted that for the stabilization of emulsions for various purposes, compositions of surfactants of different or the same nature are widely used, which leads to an increase in surface activity due to the formation of mixed micelles.*

*It is shown that at present, in the production of cosmetic emulsions, there is a tendency to use a mixture of emulsifiers of different nature, therefore, the study of the physicochemical properties of such systems is an urgent task, which significantly simplifies the procedure for developing compositions. It is shown that the purpose of this study was to determine the surface tension of a system formed by a mixture of emulsifiers, the critical concentration of micelle formation, sedimentation stability and colloidal stability. The studies*



determined the parameters of the adsorption layers of mixtures of surfactants of different nature. The maximum adsorption value at the toluene boundary and the thickness of the saturated adsorption layer of the mixture of non-ionic surfactants were determined. It was shown that it increases at the interfacial surface compared to the similar value at the solution-air interface, which indicates an increase in the hydrated layer around the oil droplets. The size of the interfacial tension at the surfactant-air interface was determined. It was shown that its value decreases to 15 mN/m, which contributes to increasing the stability of emulsions. The optimal emulsifier content was established at 4% for a mixture of ionic and non-ionic surfactants and 7% for a mixture of non-ionic surfactants. It was determined that the compositions stabilized by a combination of anionic surfactants and non-oncogenic surfactants are microheterogeneous systems with an average droplet diameter of 1.0–5.0  $\mu\text{m}$  depending on the surfactant content.

It was shown that for a mixture of non-ionic surfactants it is in the range from 4.0 to 8.0  $\mu\text{m}$  with small inclusions ranging in size from 10.0 to 16.5  $\mu\text{m}$ .

It was established that the compositions are pseudoplastic liquids with a yield point.

A comparison of the physicochemical characteristics of the compositions obtained in the presence of industrial organic emulsifiers is shown. The research data indicate that the best set of properties are possessed by emulsions stabilized by a mixture of ionic and non-ionic surfactants, which provides stability due to electrostatic and steric stability factors.

**Keywords:** emulsifier, critical micelle concentration, surface tension, emulsion viscosity, adsorption layers.

Дата першого надходження статті до видання: 17.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Золотарьова О.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-3045-8229>

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИРОБНИЦТВА СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ З РОЗРОБКОЮ СТАДІЇ ВИПАЛУ СУЛЬФУРВІСНОЇ СИРОВИНИ

*Актуальність наукової роботи зумовлена необхідністю модернізації хіміко-технологічних систем виробництва сульфатної кислоти в умовах зростання попиту на мінеральні добрива та потреби у підвищенні енергоефективності промислових агрегатів. Традиційні схеми випалу сірчаного колчедану потребують оптимізації через значні енерговитрати та високе екологічне навантаження. Пошук технічних рішень, що дозволяють інтенсифікувати процес у печах киплячого шару, забезпечити комплексну утилізацію відходів та знизити собівартість продукту, є стратегічно важливим завданням для хімічної галузі України в контексті ресурсозбереження та екологічної безпеки.*

*В роботі на підставі прийнятого технічного рішення були внесені зміни в технологічну схему виробництва сульфатної кислоти, виконаний розрахунок матеріального і теплового балансів стадії випалу сірчаного колчедану, а також конструктивний розрахунок печі киплячого шару, вибране технологічне обладнання розроблюваної стадії.*

*Запропонована система автоматизації стадії випалу колчедану дозволяє проводити технологічний процес в оптимальному режимі, що забезпечує стабільну концентрацію діоксиду сірки в обпалювальному газі та дозволяє отримувати високоякісний кінцевий продукт.*

*Виробництво сульфатної кислоти супроводжується утворенням значної кількості твердих відходів у вигляді огарку та селенових шлаків. В проекті були детально розглянуті сучасні способи утилізації вказаних відходів, що дозволяє реалізувати принципи маловідходного виробництва. Завдяки впровадженню досконалих систем очищення, викиди відходних газів ( $\text{SO}_2$  та  $\text{SO}_3$ ) мінімізовані до меж допустимих санітарних норм. Організація охорони праці та техніки безпеки на проектуваному виробництві дозволяє повністю забезпечити безпеку, збереження здоров'я та працездатність персоналу.*

*Нове технічне рішення, запропоноване в роботі, дасть можливість знизити собівартість готової продукції на 4,79%, при цьому прибуток на одиницю продукції збільшиться на 3,9%. Річний економічний ефект від зниження собівартості складатиме 19705,80 тис. грн, а капітальні витрати на модернізацію окупляться за 0,01 року, що підтверджує високу інвестиційну важливість проекту.*

**Ключові слова:** сульфатна кислота, сірчаний колчедан, випал, піч киплячого шару, каталізатор.

**Постановка проблеми.** Основним споживачем сульфатної кислоти є виробництво мінеральних добрив (суперфосфату, амоній сульфату), а також виробництво органічних проміжних сполук і барвників, вибухових речовин. Вона також використовується в нафтовій (для очистки нафтопродуктів від сполук сульфуру й неграничних органічних сполук), металообробній (для травлення металів), текстильній (у виробництві штучного волокна, для відбілювання тканин), шкіряній, деревообробувальній (при переробки деревини в етиловий спирт) промисловості, кольоровій металургії (при одержанні міді, цинку, кобальту, нікелю та ін.). Важливою властивістю сульфатної кислоти є її гігроскопічність – здатність добре поглинати

воду, що використовується в промисловості для сушки газу, а також для концентрування нітратної кислоти [1].

На сьогоднішній день сульфатну кислоту одержують двома способами: нітрозним (баштовим), що існує більше 200 років, і контактним, освоєним у промисловості наприкінці XIX і початку XX століття.

Першою стадією виробництва сульфатної кислоти за будь-яким способом є одержання сульфур (IV) оксиду (сірчистий газ) при випалі сульфурвмісної сировини. Після очищення сульфур (IV) оксид окисляється до сульфур (VI) оксиду (сірчаний газ), який поєднуючись із водою, утворює сульфатну кислоту. Реакція окиснення  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$

протікає дуже повільно, тому її прискорюють або шляхом застосування каталізатора (контактний спосіб), або шляхом використання оксидів нітрогену як передавачів кисню (нітрозний спосіб) [1].

У нітрозному способі для окиснення  $\text{SO}_2$  застосовують еквімолекулярну суміш  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$ .

Віддаючи свій кисень сульфур (IV) оксиду,  $\text{NO}_2$  і  $\text{N}_2\text{O}_3$  відновлюються до оксиду нітрогену  $\text{NO}$ . Оксид нітрогену окисляється далі киснем повітря знову до  $\text{NO}_2$ , і суміш  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$  повертається в процес.

В дослідженні обирається контактний спосіб виробництва за системою ПК-ПА, оскільки дає можливість одержувати чисту та концентровану кислоту, автоматизувати технологічний процес, знизити вміст оксидів сульфору в вихлопних газах до гранично допустимих концентрацій.

Сировиною для одержання сульфур (IV) оксиду, а отже, і для виробництва сульфатної кислоти, є елементарна сірка, сірчаний колчедан, гідроген сульфур, відхідні гази кольорової та чорної металургії [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми дослідження виробництва сульфатної кислоти з розробкою стадії випалу сульфурвмісної сировини розглядалися у роботах Іванченко Л. В., Кожухар В. Я., Концевой А. Л., Денисюк Р. О. та інших вчених. Однак і сьогодні під час проведення експерименту, дана проблема викликає багато запитань.

**Постановка завдання.** В роботі пропонується з метою інтенсифікації масо- та теплообміну процес випалу сірчаного колчедану проводити при швидкості газового потоку вище другої критичної швидкості псевдозрідження з пересиченням газового потоку над киплячим шаром циркулюючим огарком, що створює особливі гідродинамічні умови.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Новим технічним рішенням пропонується випал колчедану проводити при швидкості газового потоку вище другої критичної швидкості псевдозрідження з пересиченням газового потоку над киплячим шаром циркулюючим огарком, що створює особливі гідродинамічні умови, прискорює масо- та теплообмін і дає можливість проводити процес при  $450\text{--}550^\circ\text{C}$ , що попереджує шлакування матеріалу і підвищує надійність і зносостійкість пічних агрегатів.

Крім того, внаслідок сприятливих умов масообміну при швидкостях вище другої критичної стає можливим вести випал при надлишку кисню в дутті не вище 1,04 зі ступенем вигорання сірки

не менше 98% при  $750\text{--}900^\circ\text{C}$  і отримувати при цьому огарок в формі магнетиту  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , що можливість використовувати піритні огарки в металургії без додаткового відновлювального випалу.

Розглянемо технологічну схему виробництва сульфатної кислоти контактним способом за методом ПК-ПА з сірчаного колчедану. [4].

Флотаційний сірчаний колчедан через дозатор поступає в піч киплячого шару. Повітря на випал подається в піч знизу. Отриманий сульфур (IV) оксид, що містить 13%об.  $\text{SO}_2$ , при температурі  $\sim 700^\circ\text{C}$  подають у котел-утилізатор, де він охолоджується до температури  $420^\circ\text{C}$ . При цьому одержують енергетичну пару тиском 4 МПа і температурою  $450^\circ\text{C}$ , а також відбувається часткове очищення газу від огаркового пилу. Подальше очищення газу здійснюється в циклонах і в сухих електрофільтрах. Огарок, який уловлений в циклоні, повертається в киплячий шар печі. Це створює особливі гідродинамічні умови та прискорює масо- та теплообмін, а огарок печі та з котла-утилізатора, циклона й електрофільтра видаляється системою транспорту.

Очищення сульфур (IV) оксиду від селену, арсену та інших домішок проводиться на стадії очистки, що складається з двох промивних башт, двох мокрих електрофільтрів (поз. 8, 9) і сушильної башти.

Перша порожниста промивна башта працює в випарному режимі: циркулююча кислота охолоджує газ, при цьому тепло витрачається на випаровування води з кислоти, що поступає на зрошування. Концентрація зрошувальної кислоти в першій башті складає 35-45%мас.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  і підтримується на цьому рівні за рахунок передачі 5-10%-вої  $\text{H}_2\text{SO}_4$  з другої промивної башти. Кислота з другої башти поступає в збірник кислоти і після охолодження повертається на зрошування.

Після другої промивної башти газ проходить послідовно дві пари електрофільтрів, потім сушильну башту, що зрошується 93-94%-вою  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при  $28\text{--}30^\circ\text{C}$ . За рахунок поглинання пари води з газу зрошувальна кислота розбавляється та нагрівається, тому для зниження температури, її охолодження проводять в повітряному холодильнику. Для підтримування концентрації кислоти до неї додають кислоту з моногідратного абсорбера й знов подають на зрошування.

Перед сушильною баштою сульфур (IV) оксид розбавляють повітрям до вмісту в ньому 9%об.  $\text{SO}_2$  відповідно до технологічного режиму роботи контактного апарату.

Після сушильної башти сульфур (IV) оксид при 28-30°C проходить бризкоуловлювача і нагрівається в трьох трубчастих теплообмінниках і при температурі 420-440°C поступає на перший шар контактного апарату, де окислюється на 73,8-74%; його температура підвищується до 600°C. Пройшовши теплообмінник, газ поступає на другий шар каталізатора, де ступінь контактування досягає 86%, а температура газу зростає від 465 до 514°C. В теплообміннику температура газу знов знижується до 450°C і він направляється на третій шар контактного апарату. Тут ступінь окиснення  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$  досягає 94-94,5%, а температура підвищується до 465-470°C.

Пройшовши теплообмінники, газ при температурі 100°C поступає на абсорбцію першого ступеня: спочатку в олеумний абсорбер, потім в моногідратний. Після моногідратного абсорбера й фільтра-бризкоуловлювача газ підігрівається до 430°C в системі теплообмінників і поступає на четвертий шар каталізатора, причому концентрація в ньому  $\text{SO}_2$  складає 0,77-0,84% об. Тут ступінь окиснення  $\text{SO}_2$  досягає 80%. В теплообміннику температура газу знижується від 449 до 409°C. На п'ятому шарі окиснення  $\text{SO}_2$  досягає 87%. Загальний ступінь контактування при цьому дорівнює 99,8%.

Після п'ятого шару контактного апарату газ при температурі 409°C, пройшовши теплообмінники, віддає своє тепло і поступає на абсорбцію другого ступеня в моногідратному абсорбері. Частина сульфатної кислоти передається в збірник кислоти. Непоглинений газ, що містить 0,02-0,03% об.  $\text{SO}_2$ , викидається в атмосферу через вихлопну трубу [3].

Випал сірчаного колчедану здійснюється в печі киплячого шару. Піч має циліндричну форму з розширенням в верхній частині. Сталевий корпус печі футерований шамотною і діатомовою цеглою. Піч має завантажувальну камеру – форкамеру, яка постачається провальною і безпровальною решітками. Застосування форкамери попереджає забивання крупними кусками колчедану поду печі і дає можливість вертикально розташувати спускную трубу від тарілчастого живильника (для запобігання зависання в ній колчедану).

Под печі складається з безпровальної решітки, яка частково заходить у форкамеру, і провальної колосникової решітки. Безпровальна решітка представляє собою сталевий перфорований лист, залитий жаротривким бетоном на висоту 120 мм і заармований двома рядами круглої сталі. В отворах безпровальної решітки і колосниках проваль-

ної решіток встановлені повітряні сопла. За допомогою розподільної решітки, що встановлюється в повітряному коробі, досягається рівномірне розподілення повітря по перетину. Повітря під подину печі подається трьома потоками: під провальну і безпровальну решітки форкамери і безпровальну решітку поду.

Для інтенсифікації кипіння вологого й більш важкого, ніж огарок, колчедану під колосникову решітку подається повітря в 1,8-2 рази більше, ніж у безпровальну решітку.

Огарок видаляють із печі через бункер форкамери із протилежної сторони печі.

Для розпалювання печі над киплячим шаром похило до горизонту встановлені газові пальники.

Над решіткою в футерівці є отвори для установки охолоджувальних елементів в киплячому шарі. Охолоджувальні елементи представляють собою труби з вуглецевої сталі, по яких циркулює вода. Нагріта вода поступає в котел-утилізатор [4].

Для спостереження за станом шару й факелом горіння встановлене оглядове вікно, що обдувається повітрям. Для більш повного використання внутрішнього об'єму печі вихід газу здійснюється в центрі склепіння. Для проведення чищення і ремонту всередині печі встановлені лази, розташовані на рівні поду і розширеної верхньої циліндричної частини печі.

До введення в експлуатацію піч повинна бути ретельно просушена, щоб уникнути розтріскування й руйнування футеровки. Попередньо піч очищають від опалубки, лісів, будівельного сміття, перед сушкою повністю закривають грибки сталевими листами. В бункер тарілчастого живильника завантажують огарок або пісок на висоту не менше 300 мм. Сушку ведуть, використовуючи в якості палива сухі колоті дрова (або газ). Після досягнення температури 150°C подальший обігрів печі можна здійснювати продуктами горіння мазуту або газу. Загальна тривалість сушки в середньому 10-12 діб.

Продукти горіння й пари води видаляються, минаючи котел, через тимчасову витяжну трубу, змонтовану на люку газоходу від печі до котла. Під час сушки через охолоджуючі елементи повинна циркулювати вода. Одночасно з сушкою печі ведуть сушку та підготовку до пуску котла-утилізатора.

Виробництво сульфатної кислоти є безперервним. Це полегшує контроль і автоматизацію окремих його стадій.

У виробництві сульфатної кислоти все апарати з'єднані послідовно, тому порушення роботи

одного апарату або вузла впливає на режим всієї системи. При дотриманні технологічного режиму завод з виробництва сульфатної кислоти може працювати тривалий час без регулювання [2].

Автоматичні методи контролю та регулювання в виробництві сульфатної кислоти більш повно гарантують дотримання заданого режиму, а також дозволяють вивести обслуговуючий персонал зі шкідливих для здоров'я виробничих приміщень. При автоматичних методах контролю вимірювання проводяться безперервно.

Автоматичні прилади не тільки вказують, але і реєструють показання, а також подають сигнал при відхиленні від нормального режиму. Контроль виробництва забезпечує своєчасне виявлення відхилень технологічного режиму, з тим, щоб вчасно їх усунути і цим попередити порушення на інших ділянках. Крім того, контроль сприяє більш повному використанню встановленої апаратури, сировини та допоміжних матеріалів.

Для вимірювання температури газу, кислоти та води застосовують ртутні термометри, термометри опору і термопари. Температуру до 300-600°C заміряють термометрами опору і ртутними. Принцип дії термометра опору заснований на властивості металів змінювати провідність при зміні температури. Основною частиною термометра опору є тонка проволочка, що приєднана до приладу для вимірювання опору (логометр).

Температуру до 100°C вимірюють мідними термометрами опору. Більш високу температуру (до 300°C) вимірюють платиновими термометрами опору.

Для вимірювання температури від 300 до 1800°C застосовують термопари. Дія термопари заснована на появі електричного струму в місці спаювання двох проволочок з різних металів або сплавів. Вимірювання струму, що виникає, здійснюється гальванометром. Для захисту від руйнування термопара поміщається в захисну гільзу зі спеціальної сталі, порцеляни або кварцу [5].

Місцем будівництва виробництва сульфатної кислоти можна вибрати місто Суми – адміністративний центр Сумської області. Сумська область розташована на території Північно-Східного економічного району. До складу Північно-Східного економічного району також входять Полтавська і Харківська області. Район має вигідне економіко-географічне розташування відносно Донецько-Придніпровського економічного району.

На розміщення будь-якого хімічного підприємства найбільше впливають сировинний, паливно-енергетичний, водний, споживчий

і транспортний фактори, а також наявність трудових ресурсів. Оскільки місцем будівництва обране м. Суми, то розглянемо його з точки зору впливу цих факторів.

Оскільки в Україні відсутні поклади сірчаного колчедану, то проектоване виробництво сульфатної кислоти буде працювати на привізній сировині.

Постачальником електроенергії на проектоване виробництво буде Київська ГЕС.

Місто Суми знаходиться на березі річки Псел, тому вона буде джерелом технічної води. Для господарчо-побутових потреб вода буде відбиратися із міського водопроводу.

Розгалуженість транспортної системи Північно-Східного району забезпечить безперебійне постачання проектованого виробництва сировиною та збут готової продукції споживачам зі всієї України.

Проектоване виробництво буде повністю забезпечене висококваліфікованими трудовими кадрами – випускниками Сумського державного університету та Харківського національного технічного університету «ХПІ», а молодший виробничий персонал може набиратися з випускників машинобудівного коледжу СумДУ та Шосткінського фахового коледжу СумДУ.

Наявність сировинних, паливно-енергетичних, водних та трудових ресурсів, споживачів готової продукції і зручного транспортного сполучення дозволяє зробити висновок, що будівництво виробництва сульфатної кислоти в м. Суми є доцільним.

Аналіз техніко-економічних показників показує, що запропоновані заходи, не приведуть до зміни потужності виробництва та чисельності робітників, але скоротиться споживання енергетичних ресурсів, що зменшить собівартості одиниці продукції на 4,79%. При цьому прибуток на одиницю продукції збільшиться на 3,9 %. Одноразові витрати на заходи складають 206,30 тис.грн. Вартість основних фондів збільшиться на 0,13%. Фондовіддача незначно знизиться, рентабельність витрат на виробництво зросте на 1,0 % [6].

Річний економічний ефект від зниження собівартості продукції складе 19705,8 тис. грн, при цьому витрати окупляться за 0,01 року.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження технологічного процесу виробництва сульфатної кислоти контактним способом (система ПК-ПА) обґрунтовано доцільність модернізації стадії випалу сульфурвмісної сировини. Встановлено, що впровадження нового технічного рішення – проведення випалу сірчаного колче-

дану при швидкості газового потоку вище другої критичної швидкості псевдозрідження з рециркуляцією огарку – дозволяє досягти наступних результатів:

Інтенсифікація процесу: Створення особливих гідродинамічних умов над киплячим шаром значно прискорює масо- та теплообмін, що дає змогу знизити робочу температуру до 450–550°C без ризику шлакування матеріалу, одночасно підвищуючи зносостійкість пічних агрегатів.

Технологічна ефективність: Забезпечено високий ступінь вигорання сірки (не менше 98%) при

мінімальному надлишку кисню (не вище 1,04), що сприяє отриманню концентрованого випалювального газу (13%, SO<sub>2</sub>) та огарку у формі магнетиту (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), придатної для прямого використання в металургії.

Енергозбереження та екологічність: Використання котла-утилізатора дозволяє ефективно утилізувати тепло реакції для отримання енергетичної пари (4 МПа), а багатоступенева система очищення та подвійне контактування (99,8%) мінімізують викиди оксидів сульфуру, забезпечуючи високу екологічну безпеку виробництва.

#### Список літератури:

1. Концевой А.Л., Концевой С.А. Технологія неорганічних кислот і солей : навч. посіб. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 150 с.
2. Денисюк Р. О. Хімічна технологія : підручник. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2017. 350 с.
3. Іванченко Л.В., Кожухар В.Я., Усатюк І.І. Технологія сульфатної кислоти : навч. посіб. Одеса : ОП, 2021. 196 с.
4. Яворський В. Технологія сірки і сульфатної кислоти : підручник / В. Яворський. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2010. 404 с.
5. Концевой А.Л., Концевой С.А. Технологія і алгоритми розрахунків виробництва сульфатної кислоти : навч. посіб. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 170 с.
6. Степанюк А.Р. Пічне обладнання у хімічних процесах : навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ», 2016. 132 с.

#### **Zolotarova O.V. RESEARCH OF SULFURIC ACID PRODUCTION WITH THE DEVELOPMENT OF THE SULFUR-CONTAINING RAW MATERIALS ROASTING STAGE**

*The relevance of the scientific work is driven by the need to modernize chemical-technological systems for sulfuric acid production amidst growing demand for mineral fertilizers and the necessity to increase the energy efficiency of industrial units. Traditional pyrite roasting schemes require optimization due to significant energy consumption and high environmental impact. The search for technical solutions to intensify the process in fluidized bed furnaces, ensure comprehensive waste recycling, and reduce production costs is a strategically important task for Ukraine's chemical industry in the context of resource conservation and environmental safety.*

*In this work, based on the adopted technical solution, changes were made to the technological scheme of sulfuric acid production. Material and heat balance calculations for the pyrite roasting stage were performed, along with the structural design of a fluidized bed furnace and the selection of technological equipment for the developed stage.*

*The proposed automation system for the pyrite roasting stage allows the technological process to be conducted in an optimal mode, ensuring a stable concentration of sulfur dioxide in the roasting gas and the production of a high-quality final product.*

*Sulfuric acid production is accompanied by the generation of significant amounts of solid waste in the form of pyrite cinders and selenium sludges. The project provides a detailed review of modern disposal methods for these wastes, enabling the implementation of low-waste production principles. Thanks to the introduction of advanced purification systems, waste gas emissions (SSO<sub>2</sub> and SSO<sub>3</sub>) are minimized to within permissible sanitary limits. The organization of labor protection and industrial safety at the projected facility ensures the safety, health, and productivity of the personnel.*

*The new technical solution proposed in this qualification work will allow for a 4.79% reduction in the cost of finished products, while the profit per unit of product will increase by 3.9%. The annual economic effect from the cost reduction will amount to 19,705.80 thousand UAH, and the capital costs for modernization will pay back in 0.01 years, confirming the high investment significance of the project.*

**Keywords:** sulfuric acid, pyrite, roasting, fluidized bed furnace, catalyst.

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 661:606  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/36>

**Мітіна Н.Б.**

<https://orcid.org/0000-0002-5384-7040>

Український державний університет науки і технологій

**Мініна Ю.О.**

<https://orcid.org/0009-0009-5945-9258>

Український державний університет науки і технологій

## ОЦІНКА ДЕСТРУКЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ПОЛІПРОПІЛЕНОВИХ МЕДИЧНИХ ВІДХОДАХ ЗА УМОВ БІОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ

Сучасне зростання обсягів полімерних відходів, зокрема одноразових медичних виробів, зумовлює необхідність пошуку екологічно безпечних і ефективних методів їх утилізації. Неткані поліпропіленові матеріали, зокрема спанбонд, широко застосовуються у медичній практиці, проте характеризуються низькою здатністю до природного розкладання, що призводить до їх накопичення у навколишньому середовищі. Одним із перспективних біотехнологічних підходів до вирішення цієї проблеми є поєднання вермікультивування з використанням мікроорганізмів, здатних до деградації складних органічних сполук. Для покращення процесів біодеструкції полімерних відходів медичного призначення у статті досліджено руйнування нетканого поліпропіленового матеріалу спанбонд за участі вермікультури *Eisenia fetida* та бактерій штаму *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* УКМ В-109. Оцінено зміну маси зразків нетканого поліпропіленового матеріалу та механічних властивостей, динаміку фізико-хімічних показників субстрату, зокрема рН та електропровідності. Встановлено, що у контрольному варіанті без біологічних агентів деградація нетканого поліпропіленового матеріалу відбувалась повільно. За наявності вермікультури спостерігається зниження рН субстрату та стабілізація електропровідності, що свідчить про активізацію біохімічних процесів. Підтримання підвищених значень електропровідності та більш інтенсивне зниження рН зафіксовано в системі з поєднанням вермікультури та бактерій роду *Pseudomonas*, що підтверджено максимальною втратою маси зразків нетканого матеріалу та істотним зниженням їхньої міцності на розрив. Показано, що застосування вермікультури у поєднанні з бактеріями штаму *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* забезпечує суттєво вищу інтенсивність біодеструкції нетканого поліпропіленового матеріалу порівняно з контрольним варіантом та системою з використанням лише вермікультури, що свідчить про синергічну дію біологічних агентів. Отримані результати можуть бути використані при розробленні екологічно безпечних технологій утилізації медичних полімерних відходів.

**Ключові слова:** біодеструкція, біогумус, біологічний об'єкт, *Eisenia fetida*, бактерії, *Pseudomonas*, вермікультивування, вермікультура, вихід біомаси, мікроорганізми, полімери, полімерні відходи, композит, полімерний композит, переробка, технологія, субстрат, стан навколишнього середовища, забруднення, побутові відходи, звалище, ґрунт, забруднення ґрунту, ґрунтові умови, техногенний вплив, відходи, відходи виробництва, регенеровані відходи, екологічна безпека, екологія, екологічний стан.

**Постановка проблеми.** Неткані поліпропіленові матеріали спанбонд (НПМС), отримані розплавленням полімеру фільтрним способом є основною сировиною для виготовлення медичних виробів одноразового призначення. Широке застосування НПМС зумовлене поєднанням низької собівартості та достатніх механічних властивостей. Водночас висока хімічна й біологічна стійкість НПМС забезпечує стабільність матеріалу в процесі експлуатації, але ускладнює його деградацію та утилізацію після використання [1].

Накопичення відходів НПМС у навколишньому середовищі є актуальною екологічною проблемою, оскільки природні процеси розкладання таких матеріалів відбуваються надзвичайно повільно [2]. За даними літератури, більшість синтетичних поліолефінів практично не піддаються мікробному розщепленню в ґрунтових умовах без попередньої фізичної або хімічної модифікації поверхні [3]. У результаті полімерні волокна зберігаються в екосистемах у вигляді макро- та мікропластикових фрагментів.





Сучасні наукові дослідження зосереджені на пошуку мікроорганізмів, здатних ініціювати біодеструкцію полімерів, а також на вивченні змін фізико-хімічних властивостей матеріалів під дією бактеріальних культур. НПМС зі складною волокнистою структурою наразі залишаються недостатньо дослідженими [4]. Це ускладнює оцінку реальних механізмів і швидкості їх біодеструкції в природних умовах.

Окремий інтерес становить використання вермікультури, зокрема, черв'яків *Eisenia fetida*, які здатні змінювати фізичні властивості субстрату, підвищувати його аерацію та стимулювати розвиток мікробіоти. У ряді робіт показано, що діяльність черв'яків може сприяти фрагментації полімерних матеріалів і опосередковано впливати на мікробіологічні процеси в ґрунті [5-7]. Проте дані щодо ефективності такого підходу саме для нетканних поліпропіленових матеріалів є обмеженими та суперечливими.

Проаналізовані літературні дані не дозволяють однозначно оцінити роль бактерій та вермікультури у процесах деструкції нетканних матеріалів у ґрунтовому середовищі. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей біологічного впливу на структурні характеристики нетканних полімерів з метою обґрунтування можливостей їх екологічної утилізації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [8] показано, що мікробні консорціуми, ізольовані зі сміттєзвалища, здатні до біодеструкції поліпропіленових (PP) мікропластиків. Найбільш активний консорціум, який включав бактерії родів *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Rhodococcus* та *Stenotrophomonas*, забезпечив втрату маси поліпропілену до 17,8 % за 30 діб.

Дослідження [9] продемонстрували, що окремі штами бактерій, зокрема *Bacillus sp.* і *Rhodococcus sp.*, здатні колонізувати поверхню поліпропіленових (PP) мікропластиків і викликати їх часткову деструкцію. Після 40 діб *Rhodococcus sp.* і *Bacillus sp.* спричинили втрату маси PP приблизно на 6,4 % та 4,0 % відповідно. Це дослідження є одним із перших, яке показує спроможність окремих бактеріальних родів прямо руйнувати поліпропілен без попередньої обробки матеріалу, підкреслюючи потенціал таких штамів для біодеструкції полімерних відходів.

Авторами [10] показано, що бактерії штаму *Bacillus cereus* PP-5 здатні колонізувати поверхню поліпропіленового порошку та спричиняти його мікробну деструкцію. Протягом 30 днів інкуба-

ції на поверхні зразків спостерігалися видимі тріщини, ерозії та утворення біоплівки, що свідчить про біохімічну і фізико-хімічну модифікацію полімеру під дією бактерії, включно з окиснювальними процесами та початковим розривом полімерних ланцюгів.

Дослідниками [11] встановлено, що бактерії штаму *Fictibacillus phosphorivorans*, ізольовані з прісноводних осадов, здатні колонізувати поверхню поліпропілену та спричиняти його біодеструкцію. За 30 днів експерименту спостерігалось до 10 % втрати маси матеріалу. Біодеструкція відбувалася переважно під впливом бактерії як єдиного біологічного агента, без додаткових хімічних чи фізичних обробок, що підкреслює потенціал цього штаму для утилізації полімерних відходів.

Антарктичні штами бактерій *Pseudomonas sp. ADL15* та *Rhodococcus sp. ADL36* досліджували на здатність розкладати мікрополіпропілен (PP) у мінеральному середовищі (Bushnell – Haas) без органічних джерел вуглецю, де поліпропілен слугував єдиним субстратом для росту мікроорганізмів, протягом 40 днів. *Pseudomonas* спричинив до 17 % втрату маси PP, а *Rhodococcus* до 7 %. Структурні зміни і пошкодження поверхні полімеру свідчили про ефективну бактеріальну біодеструкцію [12].

**Виклад основного матеріалу.** За результатами попередніх досліджень встановлено, що застосування вермікультури із залученням *Eisenia fetida* забезпечує часткову біодеструкцію НПМС, у ферментованому субстраті на основі соняшникового лушпиння, що підтверджується зменшенням маси зразків та змінами їхньої мікроструктури. Отримані результати свідчили про позитивну динаміку процесу та доцільність подальшої інтенсифікації біорозкладання шляхом залучення додаткових біологічних агентів [5].

Метою даного дослідження стало вивчення впливу комбінованого біологічного комплексу вермікультури *Eisenia fetida* та бактеріального штаму *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* УКМ В-109 на процес біодеструкції одноразових медичних виробів із нетканого поліпропіленового матеріалу.

Для проведення експерименту використовували ферментований субстрат на основі модифікованого соняшникового лушпиння (СЛ). Зразки НПМС розміром 15×2 см розміщували у контейнерах об'ємом 1 л за контрольованих умов: температура 15–25 °С, вологість субстрату 60 – 80. Експериментальну схему сформовано з трьох дослідних груп (табл. 1).

Умови проведення експерименту

| № групи | Назва групи | Умови експерименту зразків НПМС у субстраті на основі модифікованого СЛ                       |
|---------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Контрольна  | без додавання біологічних агентів                                                             |
| 2       | Дослідна    | з вермікультурою <i>Eisenia fetida</i>                                                        |
| 3       | Комбінована | з біокомплексом <i>Eisenia fetida</i> та <i>P. chlororaphis subsp. aureofaciens</i> УКМ В-109 |

Масу зразків НПМС визначали торсіонними вагами WT-500. Структурні зміни матеріалу аналізували методом оптичного мікроскопіювання з використанням цифрового мікроскопа Digital Microscope MM-2288-5X-BN при збільшенні у 200 разів. Температуру, електропровідність та рівень рН субстрату контролювали за допомогою приладу Hanna HI 991300. Механічні властивості НПМС після експозиції оцінювали шляхом випробувань на розрив із використанням розривної машини РМІ-5 відповідно до вимог стандарту ISO 9073-3 [13]. Отримані дані дозволяли оцінити зміни міцнісних характеристик матеріалу під впливом різних біологічних факторів. Тривалість експерименту становила 60 діб. Через кожні 10 днів проводили зважування зразків, мікроскопічний аналіз їхнього стану та фіксацію змін у структурі й цілісності матеріалу.

Результати оптичних досліджень поверхні зразків НПМС після біодеструкції наведені на рисунку 1.

Аналіз поверхні зразків НПМС на 20-ту добу експерименту у системі з поєднанням вермікультури *Eisenia fetida* та бактерій роду *Pseudomonas* показав, що структура поліпропіленових волокон майже не змінилась. На 60-ту добу експерименту спостерігалися нерівномірності поверхні та порушенні суцільності шару спанбонду. Такі морфологічні перетворення свідчать про деструкцію матеріалу під впливом комбінованої біологічної

дії, порівняно з варіантами без бактеріального компонента.

На рисунку 2 представлено порівняльну характеристику ефективності біологічного розкладу НПМС у різних експериментальних умовах, що підтверджує перевагу використання комбінованої системи вермікультивування з бактеріями.

Зменшення маси зразків НПМС у всіх дослідних варіантах свідчить про перебіг процесів біодеструкції матеріалу, однак найбільш виражена динаміка втрати маси спостерігалася у системі з комбінованим застосуванням вермікультури *Eisenia fetida* та бактерій штаму *Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109. Порівняно з вермікультивуванням без додавання бактерій та контрольним варіантом, застосування біокомплексу суттєво посилювало деструкцію НПМС.

Активність *Eisenia fetida* сприяє формуванню умов, сприятливих для розвитку мікробіоти. Водночас введення бактеріального штаму *P. chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109 підсилює мікробіологічну складову процесу за рахунок синтезу ферментів і біологічно активних метаболітів, що полегшують подальше перетворення матеріалу у форми, доступні для дії інших мікроорганізмів.

У ході дослідження оцінювали вплив поєднання вермікультури та бактерій роду *Pseudomonas* на електропровідність субстрату і перебіг процесів

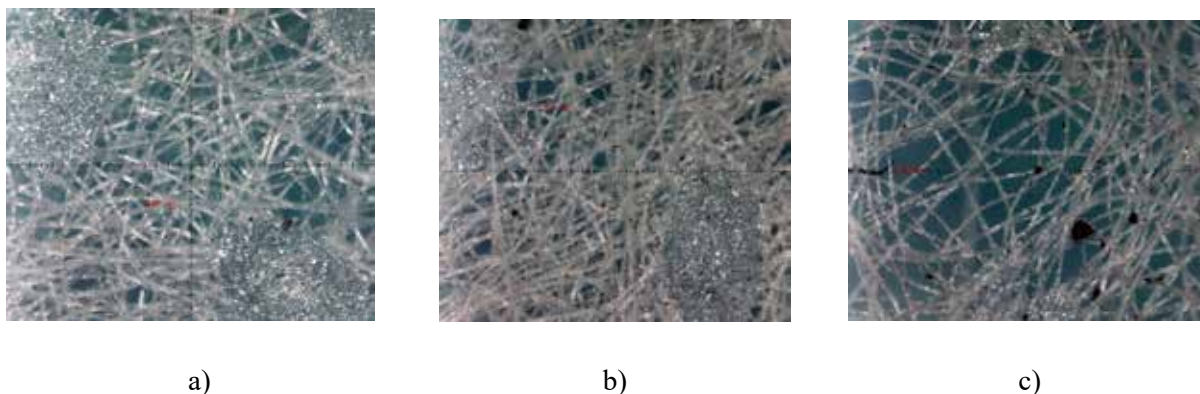


Рис. 1. Результати оптичних досліджень поверхні зразків НПМС після біодеструкції у субстратах а) первинний зразок, б) зразок у субстраті з культурою *Eisenia fetida*, в) зразок у субстраті з культурою *Eisenia fetida* та бактеріями *Pseudomonas*

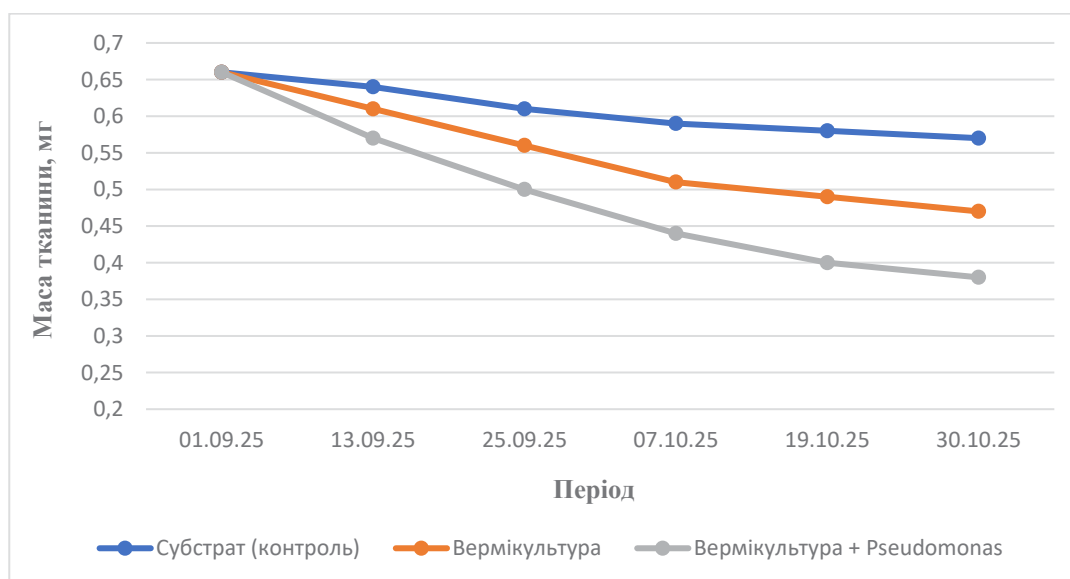


Рис. 2. Порівняння ефективності біологічного розкладу НПСМ у субстраті

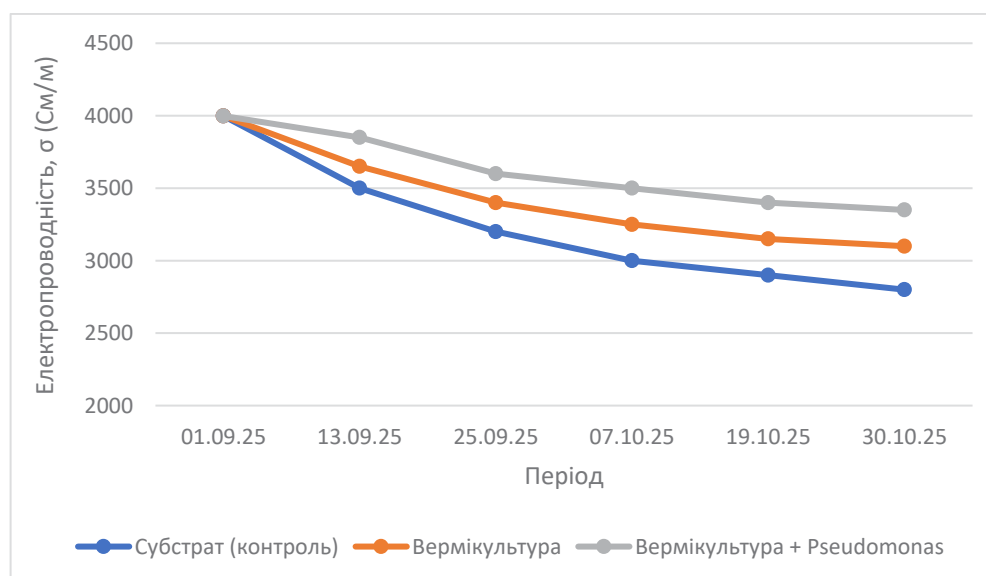


Рис. 3. Зміна електропровідності в експериментальних групах

біодеструкції НПСМ. Електропровідність субстрату розглядали як показник змін середовища, зумовлених активністю черв'яків і мікроорганізмів у процесі біодеструкції НПСМ (рис. 3)

Упродовж експерименту в усіх варіантах спостерігалось зниження електропровідності субстрату. Найбільш інтенсивне зменшення показника відмічене в контрольному варіанті, тоді як за наявності вермікультури цей процес був менш вираженим. Найвищі значення електропровідності протягом усього періоду дослідження зафіксовано у варіанті з поєднанням вермікультури та бактерій роду *Pseudomonas*, що свідчить про

активні мікробіологічні процеси та накопичення продуктів метаболізму в субстраті.

Початковий середній діаметр волокон НПСМ становив 0,021 мкм. Після завершення експерименту зафіксовано істотні зміни морфології волокон залежно від умов експозиції. У варіанті з використанням *Eisenia fetida* середній діаметр волокон спанбонду зменшився з 0,021 мкм до 0,008 мкм, тобто на 0,013 мкм, що відповідає зниженню на 61,9% від початкового значення. У контрольному субстраті без біологічних агентів діаметр волокон зменшився з 0,021 мкм до 0,013 мкм, що становить 38,1%. У зразках з поєднанням *Eisenia fetida* та

бактерій штаму *P. chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109 зменшення діаметра волокон склало 0,015 мкм, що відповідає 71,4%, і є максимальним серед досліджуваних умов.

На рисунку 4 наведено порівняльну динаміку біорозкладання НПМС у субстратах з *Eisenia fetida*, з поєднанням вермікультури та бактерій, а також без біологічних агентів, що наочно демонструє їх вплив на структуру та цілісність волокон.

Отримані результати свідчать, що вермікультування сприяє прискоренню процесів деструкції полімерного матеріалу за рахунок активності мікроорганізмів та дії ферментів, які виділяються в процесі життєдіяльності вермікультури, а також завдяки їхній взаємодії з бактеріями *Pseudomonas*.

Продовж експерименту показники рН субстрату регулярно контролювали (рис. 5). В усіх варіантах спостерігалася поступова зміна кислотно-лужних властивостей субстрату. Найбільш виражене зниження рН зафіксовано у варіанті з поєднанням вермікультури та бактерій *Pseudomonas*. Значення рН у цьому субстраті зменшилися з 7,9 на початку досліджу до 7,55 на 50-ту добу експерименту. У варіанті з використанням лише *Eisenia fetida* зафіксовано менш інтенсивне зниження рН: показник змінився з 7,9 до 7,72. Натомість у контрольному субстраті без біологічних агентів значення рН залишалося відносно стабільним і навіть демонструвало незначне підвищення з 7,9 до 7,98.

Отримані результати свідчать, що присутність вермікультури, а особливо її поєднання з бакте-

ріями, активізує біохімічні процеси в субстраті. Зниження рН може бути пов'язане з утворенням органічних кислот, продуктів метаболізму черв'яків і мікроорганізмів, а також із посиленням перебігом процесів біорозкладання полімерного матеріалу.

З графіка на рисунку 6 видно, що зниження механічних властивостей, зокрема міцності на розрив, відображає структурні зміни матеріалу, викликані біодеструкцією. Це дозволяє оцінити швидкість деградації матеріалу та його придатність для застосування в біологічно активних середовищах.

Найбільше зниження міцності на розрив спостерігалось у варіанті з поєднанням вермікультури та бактерій роду *Pseudomonas*, що свідчить про порушення структури волокон НПМС внаслідок біодеструкції. Це явище пояснюється синергічною дією двох біологічних агентів: механічним подрібненням і перемішуванням субстрату культурою *Eisenia fetida* та ферментативною активністю бактерій, які здатні розщеплювати складні органічні компоненти полімеру.

**Висновки.** Проведені дослідження підтверджують, що біодеструкція НПМС, застосовуваного у медичних одноразових виробках, відбувається значно швидше за наявності вермікультури та мікроорганізмів. У контрольних зразках, які перебували у субстраті без додавання вермікультури та мікроорганізмів, процеси деградації мали уповільнений характер і проявлялися менш виражено.

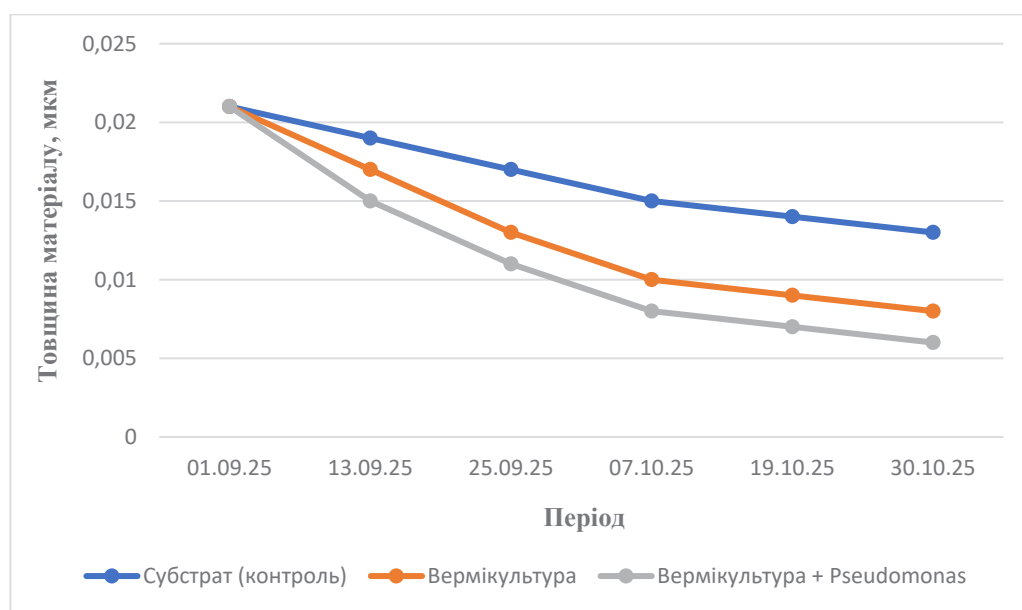


Рис. 4. Порівняльна динаміка біодеструкції НПМС в субстратах

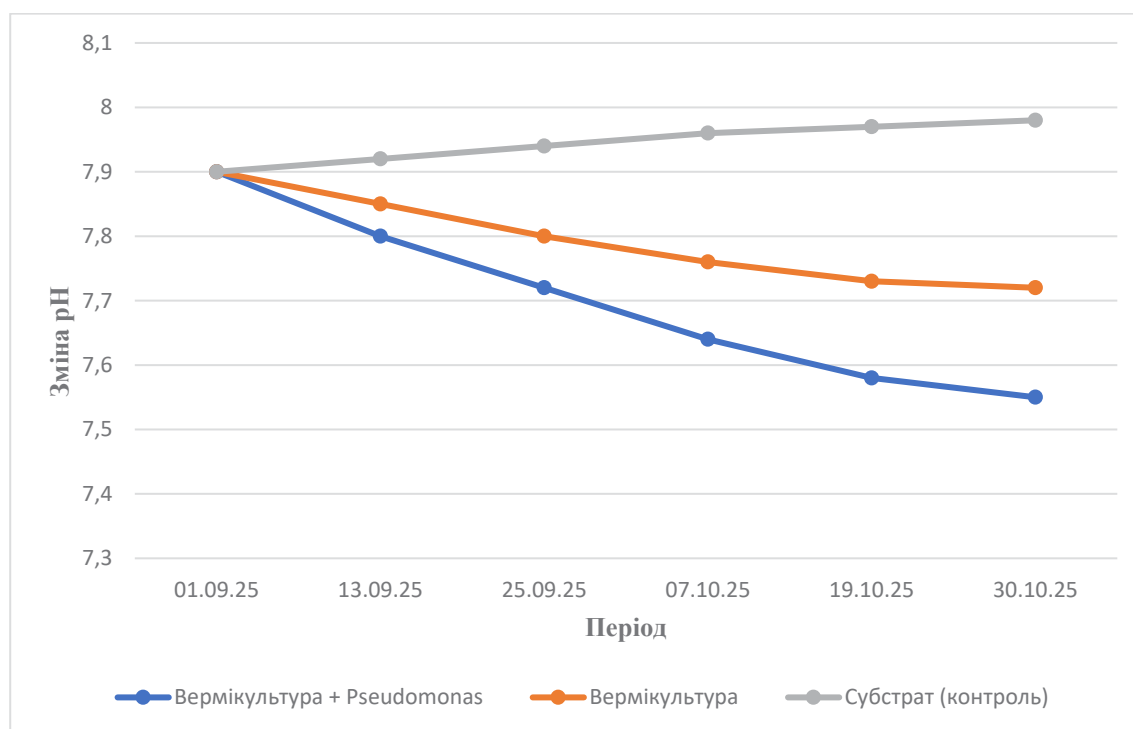


Рис. 5. Графік зміни рН під впливом мікробіологічної активності

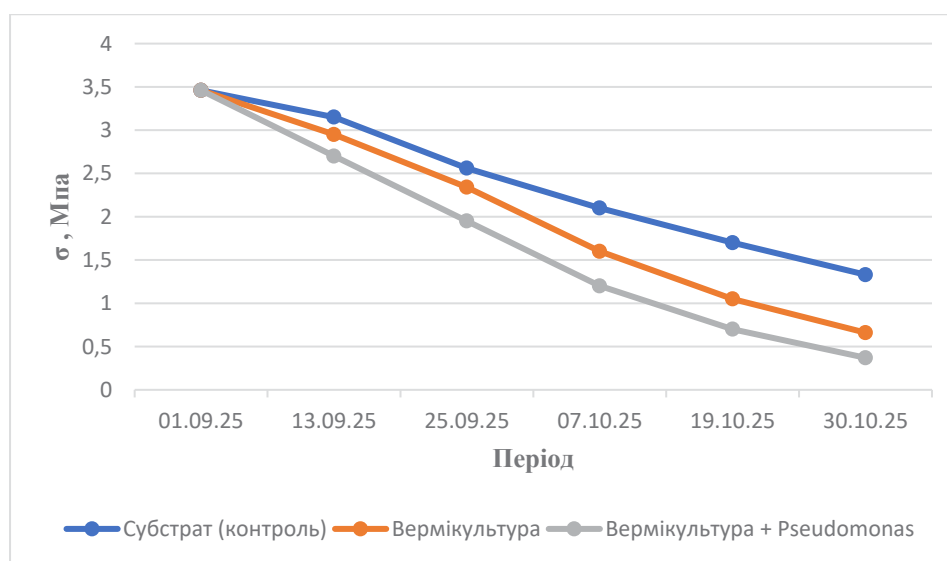


Рис. 6. Залежність міцності на розрив від субстрату

Застосування вермікультури *Eisenia fetida* сприяло активізації біохімічних процесів у субстраті, що відобразалося у зміні його фізико-хімічних показників та поступовому порушенні структури волокон НПМС. Найбільш інтенсивні процеси біодеструкції зафіксовано у комбінованій системі з використанням вермікультури і бактерій штаму *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* УКМ В-109, де спостерігалось максимальне зменшення маси зразків, істотне зниження механічних властивостей, зокрема міцності на розрив.

Динаміка електропровідності та рН субстрату свідчить про активний перебіг мікробіологічних процесів у варіантах із біологічними агентами. Підвищені значення електропровідності в комбінованій системі вказують на накопичення продуктів метаболізму, тоді як зниження рН може бути пов'язане з утворенням органічних кислот і посиленням процесів біорозкладання полімерного матеріалу. Сукупність зазначених змін підтверджує синергічну дію біологічних агентів (вермікультури та бактерій *Pseudomonas*) у процесі деструкції НПМС.

## Список літератури:

1. Andrady A. L. *Plastics and environmental sustainability*. Chichester : Wiley, 2015. 248 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119009405>
2. Мітіна Н. Б., Мініна Ю. О., Герасименко В. О. Оцінка здатності до розкладання матеріалу Meltblown під час вермікультування. *Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування: матеріали Міжнар. наук. конф. (Харків, 27–28 квітня 2023 р.)*. Харків : ДБТУ, 2023. С. 131–132.
3. Shah A. A., Hasan F., Hameed A., Ahmed S. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*. 2008. Vol. 26, Iss. 3, P. 246–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.
4. Ahmed T., Shahid M., Azeem F. et al. Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25, Iss. 8. P. 7287–7298. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>
5. Мітіна Н. Б., Мініна Ю.О. Переробка полімерних відходів вермікультуванням. Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України. 2025. Том 36 (75) № 1. 205–210 DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/29>
6. Khaldoun S., Lalung J., Maheer U. et al. A Review on the Role of Earthworms in Plastics Degradation: Issues and Challenges. *Polymers*. 2022. Vol. 14, Iss. 21. Art. 4770. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14214770>
7. Мініна Ю.О., Мітіна Н.Б., Третьяков А.О. Дослідження умов біодеградації полімер-полімерних сумішей в процесі вермікультування Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України. 2024. Том 35 (74) № 1. 113–117. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/19>
8. Choonut A., Wongfaed N., Wongthong L. et al. Microbial degradation of polypropylene microplastics and concomitant polyhydroxybutyrate production: An integrated bioremediation approach with metagenomic insights. *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Vol. 490. Art. 137806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025>
9. 9. Auta H. S., Emenike C. U., Jayanthi B., Fauziah S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 127. P. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>
10. Xue H., Chen X., Jiang Z. et al. Biodegradation of polypropylene by *Bacillus cereus* PP-5 isolated from waste landfill. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2025. Vol. 296. Art. 118205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118205>
11. Eiamsa-ard P. Polypropylene Biodegradation by *Fictibacillus phosphorivorans* Isolated from Freshwater Sediment. *The Journal of Industrial Technology*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 131–146. DOI: <https://doi.org/10.14416/j.ind.tech.2024.04.009>
12. Habib S., Iruthayam A., Abd Shukor M. Y. et al. Biodeterioration of Untreated Polypropylene Microplastic Particles by Antarctic Bacteria. *Polymers*. 2020. Vol. 12, Iss. 11. Art. 2616. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12112616>
13. Матеріали текстильні. Методи випробування нетканих матеріалів. Частина 3. Визначення розривального навантаження та видовження під час розриву (ISO 9073-3:1989, IDT) : ДСТУ ISO 9073-3:2003. [Чинний від 2004-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2004. 6 с. (Національний стандарт України).

### Mitina N.B., Mitina Yu.O. ASSESSMENT OF DESTRUCTIVE PROCESSES IN POLYPROPYLENE MEDICAL WASTE UNDER BIOLOGICAL INFLUENCE

The current increase in the volume of polymer waste, in particular disposable medical products, necessitates the search for environmentally safe and effective methods of disposal. Non-woven polypropylene materials, in particular spunbond, are widely used in medical practice, but are characterised by low natural decomposition capacity, which leads to their accumulation in the environment. One promising biotechnological approach to solving this problem is to combine vermiculture with the use of microorganisms capable of destroying complex organic compounds. To improve the processes of biodegradation of polymeric medical waste, the article investigates the destruction of non-woven polypropylene spunbond material with the participation of *Eisenia fetida* vermiculture and *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* UKM B-109 bacteria. The change in the mass of non-woven polypropylene material samples and mechanical properties, as well as the dynamics of the physicochemical indicators of the substrate, in particular pH and electrical conductivity, were evaluated. It was found that in the control variant without biological agents, the degradation of non-woven polypropylene material occurred slowly. In the presence of vermiculture, a decrease in the pH of the substrate and stabilisation of electrical conductivity were observed, indicating the activation of biochemical processes. Maintaining elevated electrical conductivity values and a more intense decrease in pH was observed in the system combining vermiculture and *Pseudomonas* bacteria, as confirmed by the maximum loss of mass of

*nonwoven material samples and a significant decrease in their tensile strength. It has been shown that the use of vermiculture in combination with Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens bacteria provides a significantly higher intensity of biodegradation of non-woven polypropylene material compared to the control variant and the system using only vermiculture, which indicates the synergistic action of biological agents. The results obtained can be used in the development of environmentally safe technologies for the disposal of medical polymer waste.*

**Keywords:** *biodegradation, biohumus, biological organism, Eisenia fetida, bacteria, Pseudomonas, vermicomposting, vermiculture, biomass yield, microorganisms, polymers, polymer waste, composite, polymer composite, processing, technology, substrate, environmental condition, pollution, municipal waste, landfill, soil, soil pollution, soil conditions, anthropogenic impact, waste, industrial waste, recycled waste, environmental safety, ecology, ecological condition.*

Дата першого надходження статті до видання: 06.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.01.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026



**Пономарьов М.Є.**<https://orcid.org/0000-0002-2736-2269>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## НОВИЙ МЕТОД КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ВКЛАДУ ПАРАМЕТРІВ РОЗЧИННИКА У ВПЛИВ НА ШВИДКІСТЬ РЕАКЦІЙ МОНОМОЛЕКУЛЯРНОГО ГЕТЕРОЛІЗУ

Розглянуто вплив параметрів розчинника на швидкість деяких реакцій мономолекулярного гетеролізу (дегідробромовання 4-бромо-2-пентену і бензоату 7 $\alpha$ -бромохолестеролу, дегідрохлорування 4-хлоро-2-пентену) і запропоновано новий метод кількісної оцінки вкладу параметрів розчинника (полярність, поляризованість, електрофільність та нуклеофільність) у прискорення реакцій в розчинниках різної природи (протонні, апротонні) і різної іонізуючої здатності. Цей новий метод полягає в порівнянні величин інкрементів в кореляційних рівняннях, які кількісно описують вплив параметрів на швидкість реакції. Доцільно порівнювати не лише абсолютні, а й відносні вклади інкрементів. Для оцінки вкладів параметрів розчинників використовувалось рівняння Коппеля – Пальма. Всі розглянуті реакції прискорюються під дією полярності і електрофільності розчинників, для бензоату 7 $\alpha$ -бромохолестеролу реакцію прискорює також поляризованість розчинника. В протонному розчиннику (метанол) переважає вклад електрофільності, в полярному апротонному (ацетонітрил) – вклад полярності. Для бензоату 7 $\alpha$ -бромохолестеролу в неполярному апротонному циклогексані суттєвий вклад зафіксовано для поляризованості розчинника. Сильний вплив електрофільності в метанолі пояснюється ефективністю електрофільної сольватації нуклеофугів, що зумовлена утворенням водневих зв'язків між іоном нуклеофуга та молекулами спирту. Теоретично обґрунтовано і експериментально доведено ефективність нового методу кількісної оцінки вкладу параметрів розчинника у вплив на швидкість реакцій. Перевагою нового методу є також конкретизація вкладів параметрів розчинників для кожного конкретного розчинника. Важливим обмеженням методу є необхідність застосування кореляційних рівнянь з тісним зв'язком між значимими параметрами і логарифмом константи швидкості – коефіцієнт кореляції повинен бути якомога вищим, бажано не нижчим 0,975. Метод може бути використаний для всіх типів реакцій при оцінці вкладів різних чинників, що викликають прискорення процесів в хімічній технології.

**Ключові слова:** вплив розчинника, параметри розчинника, полярність, поляризованість, електрофільність, вклад у прискорення реакції, кореляційні рівняння, реакції мономолекулярного гетеролізу.

**Постановка проблеми.** Кількісна оцінка впливу різноманітних чинників (структура реагентів, природа замісників, природа середовища, температура та ін.) на перебіг органічних реакцій є одною з головних задач фізичної органічної хімії. Вплив природи розчинника на перебіг органічних реакцій, в першу чергу на швидкість реакцій, є надзвичайно потужним, особливо для реакцій мономолекулярного гетеролізу (мономолекулярний сольволіз, реакції за механізмами E1, S<sub>N</sub>1). Різні властивості розчинників – полярність, поляризованість, густина енергії когезії, нуклеофільність та електрофільність розчинника – мають різний вплив не тільки на різні реакції чи

реакційні серії, але і в межах однієї реакції вклад різних властивостей розчинника у прискорення (чи сповільнення) реакції може суттєво змінюватись залежно від природи розчинника (протонні і апротонні, полярні чи неполярні розчинники).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для кількісної оцінки впливу параметрів розчинника на швидкість реакцій застосовують рівняння лінійності вільних енергій (ЛВЕ) [1, с. 120; 2, с. 140; 3, с. 1541]. Найбільш коректними є оцінки, виконані за допомогою багато-параметрових рівнянь ЛВЕ Камлета – Тафта і, особливо, Коппеля – Пальма (1), адже останнє рівняння містить найбільш вичерпний набір пара-



метрів розчинника, що можуть впливати на швидкість реакцій – параметри полярності  $f(\epsilon)$ , полярності  $f(n)$ , основності (нуклеофільності)  $B$  та електрофільності  $E$ :

$$\lg k = a_0 + a_1 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1} + a_2 \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} + a_3 B + a_4 E \quad (1)$$

В рівнянні Коппеля – Пальма  $\epsilon$  – діелектрична стала розчинника за температури 20°C,  $n$  – показник заломлення розчинника за температури 20°C,  $k$  – константа швидкості реакції в певному розчиннику. Раніше для оцінки відносного вкладу параметрів розчинника у загальну швидкість (або ефективність) процесу використовували коефіцієнти парної кореляції – вважалось, що чим більший парний коефіцієнт кореляції, тим тісніший зв'язок між швидкістю (ефективністю) процесу і тим більший вплив даної властивості на хід процесу. Такий підхід має дві хиби. Першу – далеко не завжди тісна кореляція пов'язана з сильним впливом. Другу – такий підхід не дозволяє визначити, як відносяться між собою вклади різних параметрів в різних розчинниках з різним набором величин цих параметрів.

Запропонований в даній статті новий підхід до проблеми оцінки вкладу параметрів у загальну скорбничку процесу є вільним від цих хиб. Однак, він також має певні обмеження – він добре працює лише для кореляційних рівнянь, де коректно встановлено набір значимих параметрів і відсіяні незначимі параметри.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка і застосування на прикладах нового методу кількісної оцінки вкладу параметрів розчинника в прискорення реакцій. Оскільки в рівнянні Ейрінга між десятковим логарифмом константи швидкості реакції  $\log k$  і вільною енергією активації реакції  $\Delta G^\ddagger$  є лінійна залежність [4, с. 158], то логічно зробити висновок, що інкременти відповідних параметрів в кореляційному рівнянні (наприклад, добутки  $a_1 f(\epsilon)$ ,  $a_2 f(n)$ ,  $a_3 B$ ,  $a_4 E$  в рівнянні Коппеля – Пальма) є пропорційними зниженню вільної енергії активації реакції  $\Delta G^\ddagger$ , якщо перед інкрементом стоїть знак «+», або підвищенню  $\Delta G^\ddagger$ , якщо перед інкрементом стоїть знак «-». Порівнюючи абсолютні величини добутків  $a_1 f(\epsilon)$ ,  $a_2 f(n)$ ,  $a_3 B$ ,  $a_4 E$  в кореляційному рівнянні для певної реакції, стає можливим оцінити відносний вклад відповідних параметрів у загальну зміну вільної енергії активації реакції  $\Delta G^\ddagger$  в конкретному розчиннику і в загальне прискорення реакції. Якщо всі значимі для процесу параметри розчинника пришвидшують реакцію, зменшуючи

$\Delta G^\ddagger$  реакції, то можна адекватно оцінити відносний вклад кожного з параметрів для кожного з використаних розчинників за простою формулою (2):

$$W(Y_i) = \frac{a_i \cdot Y_i}{\sum_i (a_i \cdot Y_i)} \cdot 100\% \quad (2)$$

Для перевірки дієвості запропонованого методу оцінки вкладу параметрів розчинника у вплив на швидкість реакцій доцільно вибрати реакції мономолекулярного гетеролізу. Ці реакції надзвичайно чутливі до впливу природи розчинників, для них є багато даних щодо кореляцій в літературних джерелах [1, с. 126; 2, с. 140; 3, с. 1541–1542; 5, с. 829].

**Виклад основного матеріалу.** Всі кінетичні вимірювання виконувались за допомогою вердазильного методу [5, с. 826], середні значення констант швидкості реакцій розраховувались з 2-8 паралельних кінетичних дослідів за температури 25 °C, точність термостатування в кюветах спектрофотометрів становила  $\pm 0,1$  °C. Для оцінки вкладу параметрів розчинника у вплив на швидкість реакцій нами було обрано 3 реакції: перша – дегідробромування 4-бромо-2-пентену (Рис. 1), є дані у 35 розчинниках, з них 13 протонних і 22 апротонних [6, с. 79].

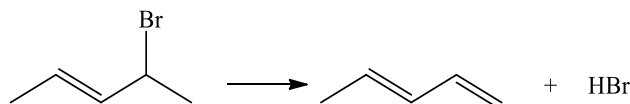


Рис. 1. Реакція дегідробромування 4-бромо-2-пентену

Дані кінетичних дослідів для дегідробромування 4-бромо-2-пентену наведені в Табл. 1.

Друга реакція – дегідрохлорування 4-хлоро-2-пентену (Рис. 2), є дані у 32 розчинниках, 11 протонних і 21 апротонному. Вона взята для вивчення ролі нуклеофуга при порівнянні даних для субстратів, що відрізняються лише природою нуклеофуга [7, с. 14].

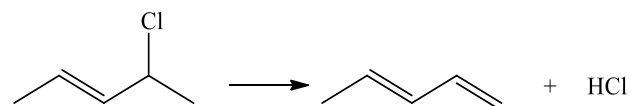


Рис. 2. Реакція дегідрохлорування 4-хлоро-2-пентену

Дані кінетичних дослідів для дегідрохлорування 4-хлоро-2-пентену наведені в Таблиці 2.

Таблиця 1

## Дані кінетичних дослідів дегідробромовування 4-бромо-2-пентену

| №  | Розчинник              | $k, \text{с}^{-1}$              | $-\lg k$ | №  | Розчинник               | $k, \text{с}^{-1}$              | $-\lg k$ |
|----|------------------------|---------------------------------|----------|----|-------------------------|---------------------------------|----------|
| 1  | MeOH                   | $(2,19 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$ | 2,66     | 19 | Бензонітрил             | $(1,02 \pm 0,02) \cdot 10^{-6}$ | 5,99     |
| 2  | EtOH                   | $(4,90 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$ | 3,31     | 20 | 1,2-Дихлороетан         | $(6,03 \pm 0,12) \cdot 10^{-7}$ | 6,22     |
| 3  | PrOH                   | $(1,69 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$ | 3,77     | 21 | Дихлорометан            | $(8,13 \pm 0,03) \cdot 10^{-7}$ | 6,09     |
| 4  | <i>n</i> -BuOH         | $(1,38 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$ | 3,86     | 22 | Хлоробензол             | $(1,55 \pm 0,03) \cdot 10^{-8}$ | 7,81     |
| 5  | <i>i</i> -PrOH         | $(7,24 \pm 0,14) \cdot 10^{-5}$ | 4,14     | 23 | Бромобензол             | $(1,41 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$ | 7,85     |
| 6  | 2-BuOH                 | $(5,13 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$ | 4,29     | 24 | Ацетофенон              | $(5,01 \pm 0,03) \cdot 10^{-7}$ | 6,3      |
| 7  | <i>n</i> -HexOH        | $(7,08 \pm 0,14) \cdot 10^{-5}$ | 4,15     | 25 | Циклогексан             | $(2,57 \pm 0,05) \cdot 10^{-9}$ | 8,59     |
| 8  | <i>n</i> -OctOH        | $(5,62 \pm 0,11) \cdot 10^{-5}$ | 4,25     | 26 | Тетрахлорометан         | $(1,10 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$ | 7,96     |
| 9  | <i>i</i> -BuOH         | $(1,48 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$ | 3,83     | 27 | Тетрагідрофуран         | $(6,76 \pm 0,13) \cdot 10^{-8}$ | 7,17     |
| 10 | Циклогексанол          | $(3,63 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$ | 4,44     | 28 | Толуол                  | $(1,44 \pm 0,03) \cdot 10^{-8}$ | 7,84     |
| 11 | <i>n</i> -AmOH         | $(4,47 \pm 0,09) \cdot 10^{-5}$ | 4,35     | 29 | Бензол                  | $(2,75 \pm 0,04) \cdot 10^{-8}$ | 7,56     |
| 12 | <i>t</i> -AmOH         | $(4,68 \pm 0,09) \cdot 10^{-6}$ | 5,33     | 30 | <i>o</i> -Ксилол        | $(1,22 \pm 0,05) \cdot 10^{-8}$ | 7,92     |
| 13 | <i>t</i> -BuOH         | $(1,49 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$ | 4,83     | 31 | Циклогексанон           | $(2,63 \pm 0,05) \cdot 10^{-7}$ | 6,58     |
| 14 | Пропілен карбонат      | $(2,69 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$ | 4,57     | 32 | Диметоксиетан           | $(3,63 \pm 0,07) \cdot 10^{-7}$ | 6,44     |
| 15 | Ацетонітрил            | $(1,05 \pm 0,02) \cdot 10^{-5}$ | 4,98     | 33 | Етилацетат              | $(4,17 \pm 0,08) \cdot 10^{-8}$ | 7,38     |
| 16 | $\gamma$ -Бутиролактон | $(7,94 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$  | 5,1      | 34 | Нітробензол             | $(8,51 \pm 0,11) \cdot 10^{-7}$ | 6,07     |
| 17 | Ацетон                 | $(7,08 \pm 0,14) \cdot 10^{-7}$ | 6,15     | 35 | <i>o</i> -Дихлоробензол | $(1,91 \pm 0,04) \cdot 10^{-8}$ | 7,72     |
| 18 | Етилметилкетон         | $(5,75 \pm 0,11) \cdot 10^{-7}$ | 6,24     |    |                         |                                 |          |

Таблиця 2

## Дані кінетичних дослідів дегідрохлорування 4-хлоро-2-пентену

| №  | Розчинник              | $k, \text{с}^{-1}$              | $-\lg k$ | №  | Розчинник               | $k, \text{с}^{-1}$              | $-\lg k$ |
|----|------------------------|---------------------------------|----------|----|-------------------------|---------------------------------|----------|
| 1  | MeOH                   | $(1,74 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$ | 3,76     | 17 | 1,2-Дихлороетан         | $(9,55 \pm 0,01) \cdot 10^{-9}$ | 8,02     |
| 2  | EtOH                   | $(2,51 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$ | 4,60     | 18 | Дихлорометан            | $(8,91 \pm 0,04) \cdot 10^{-9}$ | 8,05     |
| 3  | PrOH                   | $(1,38 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$ | 4,86     | 19 | Хлоробензол             | $(4,90 \pm 0,06) \cdot 10^{-9}$ | 8,31     |
| 4  | <i>n</i> -BuOH         | $(7,59 \pm 0,10) \cdot 10^{-6}$ | 5,12     | 20 | Бромобензол             | $(6,76 \pm 0,10) \cdot 10^{-9}$ | 8,17     |
| 5  | <i>i</i> -PrOH         | $(1,00 \pm 0,08) \cdot 10^{-5}$ | 5,00     | 21 | Ацетофенон              | $(1,55 \pm 0,14) \cdot 10^{-8}$ | 7,81     |
| 6  | <i>n</i> -HexOH        | $(6,31 \pm 0,12) \cdot 10^{-6}$ | 5,20     | 22 | Циклогексан             | $(1,29 \pm 0,05) \cdot 10^{-9}$ | 8,89     |
| 7  | <i>n</i> -OctOH        | $(4,37 \pm 0,12) \cdot 10^{-6}$ | 5,36     | 23 | Тетрахлорометан         | $(1,74 \pm 0,08) \cdot 10^{-9}$ | 8,76     |
| 8  | <i>i</i> -BuOH         | $(9,12 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$ | 5,04     | 24 | Тетрагідрофуран         | $(4,68 \pm 0,13) \cdot 10^{-9}$ | 8,33     |
| 9  | Циклогексанол          | $(3,47 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$ | 5,46     | 25 | Толуол                  | $(3,02 \pm 0,01) \cdot 10^{-9}$ | 8,52     |
| 10 | 2-BuOH                 | $(2,63 \pm 0,04) \cdot 10^{-6}$ | 5,58     | 26 | Бензол                  | $(2,34 \pm 0,04) \cdot 10^{-9}$ | 8,63     |
| 11 | <i>t</i> -BuOH         | $(9,12 \pm 0,08) \cdot 10^{-7}$ | 6,04     | 27 | <i>o</i> -Ксилол        | $(3,55 \pm 0,07) \cdot 10^{-9}$ | 8,45     |
| 12 | Пропіленкарбонат       | $(1,07 \pm 0,11) \cdot 10^{-7}$ | 6,97     | 28 | Циклогексанон           | $(1,95 \pm 0,08) \cdot 10^{-8}$ | 7,71     |
| 13 | Ацетонітрил            | $(7,41 \pm 0,15) \cdot 10^{-8}$ | 7,13     | 29 | Диметоксиетан           | $(6,46 \pm 0,03) \cdot 10^{-9}$ | 8,19     |
| 14 | $\gamma$ -Бутиролактон | $(4,47 \pm 0,09) \cdot 10^{-8}$ | 7,35     | 30 | Етилацетат              | $(8,13 \pm 0,13) \cdot 10^{-9}$ | 8,09     |
| 15 | Ацетон                 | $(2,29 \pm 0,06) \cdot 10^{-8}$ | 7,64     | 31 | Нітробензол             | $(1,41 \pm 0,04) \cdot 10^{-8}$ | 7,85     |
| 16 | Хлороформ              | $(1,23 \pm 0,03) \cdot 10^{-8}$ | 7,91     | 32 | <i>o</i> -Дихлоробензол | $(6,31 \pm 0,07) \cdot 10^{-9}$ | 8,2      |

В цих двох реакціях швидкість залежить лише від полярності та електрофільності розчинника (рівняння 3 і 4 відповідно).

$$\lg k = -9,80 + 3,681f(\epsilon) + 0,064E, R = 0,979 \quad (3)$$

Тут і нижче в рівняннях (3 – 5)  $R$  – коефіцієнт множинної кореляції

$$\lg k = -9,57 + 1,49f(\epsilon) + 0,075E, R = 0,983 \quad (4)$$

Третя обрана реакція – це дегідробромовування бензоату 7 $\alpha$ -бромохолестеролу, вона є ключо-

вою стадією в промисловому синтезі вітаміну D<sub>3</sub> (Рис. 3).

Дегідробромовування бензоату 7 $\alpha$ -бромохолестеролу досліджене мною в 26 апротонних розчинниках різної іонізуючої сили – і в полярних, і в неполярних, реакцію прискорюють аж 3 параметри – електрофільність, полярність і поляризованість розчинника (рівняння 5).

$$\lg k = -11,92 + 4,80f(\epsilon) + 5,61f(n) + 0,064E, R = 0,977 \quad (5)$$

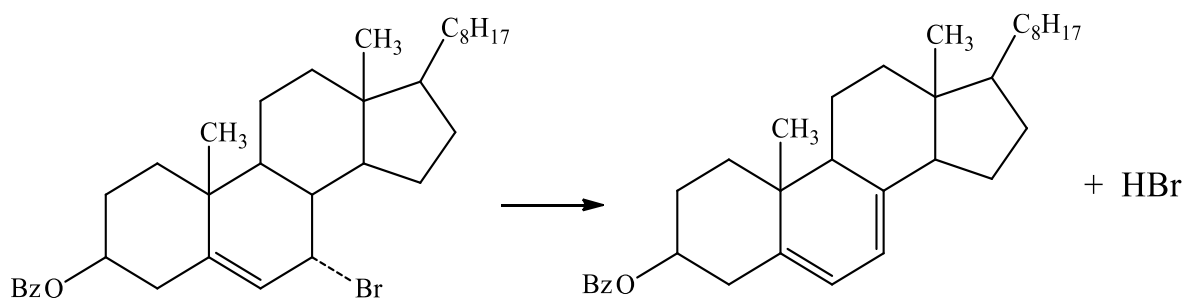


Рис. 3. Реакція дегідробромовання бензоату 7α-бромохолестеролу

Нуклеофільність розчинника взагалі не впливає на швидкість всіх трьох наведених реакцій, параметр основності розчинника в рівнянні Коппеля-Пальма для всіх трьох реакцій є незначимим, його видалення не змінює якості кореляцій і не зменшує коефіцієнти множинної кореляції.

Для оцінки вкладів параметрів у прискорення обраних реакцій було вибрано чотири апротонних розчинників різної полярності – сильнополярний ацетонітрил, середньополярні бромобензол або хлоробензол та неполярний циклогексан для всіх трьох субстратів, а для дегідрогалогенування 4-бромо-2-пентену і 4-хлоро-2-пентену – також протонний і сильнополярний метанол. Вибір розчинників різної полярності та різної іонізуючої сили зумовлений необхідністю показати суттєву різницю впливу параметрів розчинника для однієї і тої ж реакції у випадках різної іонізуючої сили розчинника.

Результати розрахунків за рівнянням (2) для оцінки вкладу параметрів розчинників у реакції дегідрогалогенування 4-бромо-2-пентену і 4-хлоро-2-пентену та величини  $\lg k$  наведено в таблицях 3 і 4 відповідно.

В метанолі, як і в інших протонних розчинниках, вклад електрофільності є вищим, ніж вклад полярності завдяки інтенсивній електрофільній сольватації нуклеофугів. Вища концентрація негативного заряду на хлорид-іоні порівняно з бромід-іоном спричиняє більш інтенсивну електрофільну сольватацію 4-хлоро-2-пентену і відчутно полегшує гетероліз ковалентного зв'язку C – Cl,

тому вклад електрофільності в прискорення реакції мономолекулярного дегідрогалогенування відчутно більший для 4-хлоро-2-пентену відносно 4-бромо-2-пентену, особливо в полярних метанолі та ацетонітрилі. Зі зменшенням іонізуючої здатності розчинника і зменшенням  $\lg k$  відчутно зростає переважний вклад полярності  $f(\epsilon)$  в прискорення реакцій дегідрогалогенування, а, отже, і загалом реакцій мономолекулярного гетеролізу. При переході від метанолу до бромобензолу вклад полярності змінюється від слабкого (23 %) до потужного (87 %) для 4-хлоро-2-пентену і від помірного (47 %) до домінуючого (95%) для 4-бромо-2-пентену.

Дані кінетичних дослідів для дегідробромовання бензоату 7α-бромохолестеролу в апротонних розчинниках наведені в Таблиці 5.

Результати розрахунків за рівнянням (2) для оцінки вкладу параметрів розчинників у реакцію дегідробромовання бензоату 7α-бромохолестеролу та величини  $\lg k$  наведено в таблиці 6.

Для дегідробромовання бензоату 7α-бромохолестеролу характерними є високі (53-64%) вклади полярності в усіх наведених розчинниках, малі (в ацетонітрилі) і практично відсутні (в хлоробензолі і циклогексані) вклади електрофільності і значні вклади поляризованості в малополярних хлоробензолі і циклогексані. Значний вклад поляризованості в малополярних розчинниках пояснюється характером утворюваних при гетеролізі зв'язку C – Br великих іонів, що робить малоефективною електрофільну сольватацію іонів.

Таблиця 3

**Абсолютні та відносні вклади параметрів розчинників у прискорення дегідробромовання 4-бромо-2-пентену**

| Розчинник   | $\lg k$ | Вклад $f(\epsilon)$ в $\lg k$ | Вклад $f(\epsilon)$ , % | Вклад E в $\lg k$ | Вклад E, % |
|-------------|---------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|------------|
| Метанол     | -2,66   | 3,46                          | 46,6                    | 3,97              | 53,4       |
| Ацетонітрил | -4,98   | 3,48                          | 72,1                    | 1,34              | 27,9       |
| Бромобензол | -7,85   | 2,56                          | 95,0                    | 0,134             | 5,0        |
| Циклогексан | -8,59   | 1,24                          | 100                     | 0                 | 0          |

Таблиця 4

**Абсолютні та відносні вклади параметрів розчинників у прискорення дегідрохлорування  
4-хлоро-2-пентену**

| Розчинник   | lg k  | Вклад f(ε) в lg k | Вклад f(ε), % | Вклад E в lg k | Вклад E, % |
|-------------|-------|-------------------|---------------|----------------|------------|
| Метанол     | -3,76 | 1,43              | 23,5          | 4,65           | 76,5       |
| Ацетонітрил | -7,13 | 1,438             | 47,7          | 1,575          | 52,3       |
| Бромобензол | -8,17 | 1,056             | 87,0          | 0,158          | 13,0       |
| Циклогексан | -8,89 | 0,514             | 100           | 0              | 0          |

Таблиця 5

**Дані кінетичних дослідів для дегідробромування бензоату 7α-бромохолестеролу**

| №  | Розчинник        | k, с <sup>-1</sup>           | -lg k | №  | Розчинник        | k, с <sup>-1</sup>           | -lg k |
|----|------------------|------------------------------|-------|----|------------------|------------------------------|-------|
| 1  | 2                | 3                            | 4     | 1  | 2                | 3                            | 4     |
| 1  | Ацетонітрил      | (2,40±0,10)·10 <sup>-4</sup> | 3,62  | 14 | Тетрагідрофуран  | (8,5±1,1)·10 <sup>-8</sup>   | 7,07  |
| 2  | Пропіленкарбонат | (1,24±0,13)·10 <sup>-4</sup> | 3,91  | 15 | o-Дихлоробензол  | (5,94±0,09)·10 <sup>-8</sup> | 7,23  |
| 3  | γ-Бутиролактон   | (4,83±0,37)·10 <sup>-5</sup> | 4,32  | 16 | Етилацетат       | (5,11±0,34)·10 <sup>-8</sup> | 7,29  |
| 4  | Бензонітрил      | (6,01±0,14)·10 <sup>-6</sup> | 5,23  | 17 | Фенетол          | (5,10±0,01)·10 <sup>-8</sup> | 7,29  |
| 5  | Дихлорометан     | (5,14±0,27)·10 <sup>-6</sup> | 5,29  | 18 | 1,4-Діоксан      | (4,89±0,46)·10 <sup>-8</sup> | 7,31  |
| 6  | Ацетон           | (4,68±0,16)·10 <sup>-6</sup> | 5,34  | 19 | Метилхлороформ   | (2,88±0,05)·10 <sup>-8</sup> | 7,54  |
| 7  | Хлороформ        | (3,50±0,11)·10 <sup>-6</sup> | 5,46  | 20 | Бензол           | (2,60±0,12)·10 <sup>-8</sup> | 7,59  |
| 8  | Нітробензол      | (3,48±0,15)·10 <sup>-6</sup> | 6,92  | 21 | Дифеніловий етер | (2,11±0,07)·10 <sup>-8</sup> | 7,68  |
| 9  | 1,2-Дихлороетан  | (1,77±0,12)·10 <sup>-6</sup> | 5,75  | 22 | o-Ксилол         | (1,43±0,09)·10 <sup>-8</sup> | 7,85  |
| 10 | 2-Бутанон        | (1,18±0,04)·10 <sup>-6</sup> | 5,93  | 23 | Дибутиловий етер | (6,31±0,11)·10 <sup>-9</sup> | 8,20  |
| 11 | Циклогексанон    | (7,22±0,35)·10 <sup>-7</sup> | 6,14  | 24 | Толуол           | (5,12±0,32)·10 <sup>-9</sup> | 8,29  |
| 12 | Хлоробензол      | (1,19±0,06)·10 <sup>-7</sup> | 6,92  | 25 | Діетиловий етер  | (3,6±0,36)·10 <sup>-9</sup>  | 8,44  |
| 13 | Етилбензоат      | (1,06±0,07)·10 <sup>-7</sup> | 6,97  | 26 | Циклогексан      | (2,88±0,1)·10 <sup>-10</sup> | 9,54  |

Таблиця 6

**Абсолютні та відносні вклади параметрів розчинників у прискорення дегідробромування  
бензоату 7α-бромохолестеролу**

| Розчинник   | lg k  | Вклад f(ε) в lg k | Вклад f(ε), % | Вклад f(n) в lg k | Вклад f(n), % | Вклад E в lg k | Вклад E, % |
|-------------|-------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|----------------|------------|
| Ацетонітрил | -3,62 | 4,55              | 63,9          | 1,18              | 16,6          | 1,395          | 19,5       |
| Хлоробензол | -6,92 | 3,35              | 64,5          | 1,71              | 32,9          | 0,134          | 2,6        |
| Циклогексан | -9,54 | 1,62              | 52,8          | 1,438             | 47,2          | 0              | 0          |

Запропонований метод дозволяє порівнювати не лише відносні, але і абсолютні вклади параметрів розчинників у прискорення реакцій. Так, порівнюючи абсолютні вклади електрофільності в дегідробромування 4-бромо-2-пентену та в дегідрохлорування 4-хлоро-2-пентену в ацетонітрилі (1,34 та 1,575 відповідно), можемо зробити висновок про те, що чутливість до впливу електрофільності в дегідрохлорування 4-хлоро-2-пентену є значно вищою, ніж у дегідробромування 4-бромо-2-пентену.

**Висновки.** Запропоновано, теоретично обґрунтовано і апробовано на декількох об'єктах новий метод кількісної оцінки вкладу параметрів розчинника у вплив на швидкість реакцій на прикладі реакцій мономолекулярного гетеролізу – дегідро-

галогенування 4-бромо-2-пентену, 4-хлоро-2-пентену та бензоату 7α-бромохолестеролу. В протонному розчиннику – метанолі – найбільшим є вклад електрофільності, що пояснюється ефективною електрофільною сольватацією нуклеофугів внаслідок утворення водневих зв'язків між негативно зарядженим нуклеофугом і гідроксильними групами спирту. Проте в апротонних розчинниках (і полярних, і неполярних) суттєво більшим є вклад полярності розчинника. Для бензоату 7α-бромохолестеролу в апротонних розчинниках, де і проводять реакцію в промислових умовах, суттєвим є також вклад поляризованості розчинника, який наростає зі зменшенням полярності, а вклади електрофільності в малополярних апротонних розчинниках стають незначними.

Список літератури:

1. Katritzky A.R., Topsom R.D. Linear Free Energy Relationships and Optical Spectroscopy. P. 119-137. In: *Advances in Linear Free Energy Relationships*. / ed. by N.B. Chapman, J. Shorter. Springer. Boston, MA. 1972. 486 p. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8660-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8660-9_3)
2. Catalán J. Solvatochromic Correlation Analysis of Monomolecular SN1/E1 Heterolysis Reactions of Tertiary Haloalkanes. *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 324. P. 114–699. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114699>.
3. Streidl N., Denegri D., Kronja O., Mayr H. A Practical Guide for Estimating Rates of Heterolysis Reactions. *Accounts of Chemical Research*. 2010. Vol.43, No 12. P. 1537–1549. <https://doi.org/10.1021/ar100091m>
4. Gordon A., Ford R. *The Chemist's Companion*. (1972). N.Y. – London – Sydney – Toronto: John Wiley & Sons. 541p.
5. Dvorko G.F., Ponomareva E.A., Ponomarev M.E. Role of Nucleophilic Solvation and the Mechanism of Covalent Bond Heterolysis. *Journal of Physical Organic Chemistry*. 2004. Vol. 17, No 1. P. 825–836. <https://doi.org/10.1002/poc.757>
6. Пономарьов М.Є., Дрозд Д.М., Каменська Т.А. Вибір оптимального модельного субстрата для порівняння Грюнвальда – Вінстейна у дослідженнях мономолекулярного сольволізу. *Scientific works SWorld*. 2013. Т.5, Вип. 4. С. 78–79.
7. Пономарьов М.Є., Дрозд Д.М., Каменська Т.А. Порівняльний аналіз впливу природи розчинника на кінетику гетеролізу 4-бромо-2-пентену та 4-хлоро-2-пентену *Scientific papers SWorld*. 2016. Т. 7. Вип. 2 (43). С. 11–15.

**Ponomarev M.E. NOVEL METHOD FOR QUANTIFICATION OF THE IMPACT OF SOLVENT PARAMETERS TO THE EFFECT ON THE RATES OF UNIMOLECULAR HETEROLYSIS REACTIONS**

*The effect of solvent parameters on the rates of some reactions of unimolecular heterolysis (4-bromo-2-pentene and 7 $\alpha$ -cholesterol benzoate dehydrobromination and 4-chloro-2-pentene dehydrochlorination) is studied and novel method for quantification of the impact of solvent parameters (polarity, polarizability, nucleophilicity and electrophilicity) to acceleration of the rates of unimolecular heterolysis reactions in the solvents of different nature (protic, aprotic) and different ionizing power is proposed. This new method compares the values of the increments in the correlation equations, which quantitatively describe the influence of parameters on the reaction rate. It is advisable to compare not only the absolute, but also the relative contributions of the increments. The Koppel-Palm equation was used to estimate the contributions of the solvent parameters. Solvent polarity and electrophilicity accelerate all considered reactions, 7 $\alpha$ -cholesterol benzoate dehydrobromination is also accelerated by solvent polarizability. The impact of electrophilicity to the processes dominates in protic solvent (methanol) while in polar aprotic solvent (acetonitrile) dominates the impact of solvent polarity. For 7 $\alpha$ -cholesterol benzoate dehydrobromination the impact of solvent polarizability is very essential. Strong influence of electrophilicity in methanol is explained by the efficiency of electrophilic solvation of nucleofuges, caused by formation of hydrogen bonds between the nucleofuge ion and alcohol molecules. Efficiency of novel method for quantifying the impact of solvent parameters to the rates of unimolecular heterolysis reactions has been justified theoretically and proved experimentally. An advantage of the new method is also the specification of the contributions of solvent parameters for each solvent separately. An important limitation of the method is the need to use correlation equations with close relationship between significant parameters and the logarithm of the rate constant – the correlation coefficient should be as high as possible, preferably higher than 0,975. The method can be used for all types of reactions when the contributions of various factors that cause the acceleration of processes in chemical technology are assessed.*

**Keywords:** solvent effect, solvent parameters, polarity, polarizability, electrophilicity, impact to reaction's acceleration, correlation equations, unimolecular heterolysis reactions.

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 667.63

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/38>**Солдатенков В.Ю.**<https://orcid.org/0009-0001-7431-6361>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Мельник Л.І.**<https://orcid.org/0000-0001-5139-3105>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СУЧАСНІ СТРАТЕГІЇ СТВОРЕННЯ РЕСУРСОЕФЕКТИВНИХ БЕЗФТОРНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ГІДРОФОБНИХ ПОКРИТТІВ

У роботі систематизовано сучасні стратегії створення ресурсоефективних безфторних гідрофобних і супергідрофобних покриттів з акцентом на поєднання екологічності, технологічності та довговічності. Розглянуто природу гідрофільності і гідрофобності відповідно до моделей Юнга, Венцеля і Кассі–Бакстера; показано, що супергідрофобний стан (кут змочування  $> 150^\circ$  та кут скошування  $< 10^\circ$ ) формується за рахунок сумісної дії низької поверхневої енергії та ієрархічної мікро- та наношорсткості у моделі, наближеної до Кассі–Бакстера. Розкрита тема практичних переваг від застосування гідрофобних покриттів на практиці. Зокрема, найперспективнішими галузями для їх використання є автотранспортна, енергетична, авіаційна, будівнича, судноплавна. Виділено, що основні переваги від використання гідрофобних покриттів у наведених галузях є: захист корпусів транспортних засобів від корозії, сповільнення утворення льоду на поверхнях, їх самоочищення; визначені основні вимоги до гідрофобних покриттів у даних галузях, якими є: стійкість до УФ опромінення, зносостійкість і механічна міцність, прозорість, термостійкість. Обґрунтовано актуальність переходу від фторвмісних систем (PFAS) до безфторних альтернатив у зв'язку з екологічними ризиками та посиленням регуляторних обмежень. Узагальнено безфторні рішення: силосанову модифікацію водних емульсій плівкоутворювачів, core-shell системи, PDMS-модифіковані поліуретани, золь-гель системи на базі алкоксисиланів; воски та жирні кислоти як агенти зниження поверхневої енергії; використання наповнювачів ( $\text{SiO}_2$ , діатоміт, наноцелюлоза, оксиди металів) для формування ієрархічної структури та досягнення супергідрофобного стану; двокомпонентні та самолікуючі системи, де зшити матриця або динамічні зв'язки підвищують опір абразивної дії та дозволяють відновлювати функціональну поверхню. Сформульовано основні вимоги до безфторних покриттів і вказано, що найбільш перспективними є архітектури з об'ємною гідрофобністю з впровадженням механізмів само-відновлення, підкріплені стандартизованими випробуваннями механічної, УФ- та хімічної стійкості.

**Ключові слова:** безфторні покриття, гідрофобність, супергідрофобність, крайовий кут змочування, стани Венцеля та Кассі–Бакстера, ієрархічна мікро- та наношорсткість, золь-гель технології.

**Постановка проблеми.** Однією з ключових властивостей твердих поверхонь є змочуваність водою. Найпоширенішим критерієм її оцінювання є визначення кута змочування. Кут змочування – кут, утворений дотичними до міжфазних поверхонь «рідина–газ» та «тверде тіло – рідина», що має вершину в точці контакту трьох фаз; найпоширенішим методом його вимірювання є оптичний метод сидячої краплі. Поверхні з кутом менше  $90^\circ$  вважають гідрофільними, а з кутом понад  $90^\circ$  – гідрофоб-

ними. До супергідрофобних відносять поверхні, для яких кут змочування перевищує  $150^\circ$ , а кут скошування краплі (який корелює з гістерезисом кута змочування) становить менше  $10^\circ$  [1].

Принцип змочування поверхні можна пояснити за допомогою теоретичних моделей Юнга, Венцеля та Кассі–Бакстера. Модель Юнга описує умови термодинамічної рівноваги між твердою, рідкою та газоподібною фазами на ідеально гладкій та однорідній твердій поверхні. Прак-





тичне застосування цієї моделі у реальному житті майже неможливе, оскільки поверхні найчастіше є неоднорідними з хімічної точки зору, а з фізичної точки зору мають певну міру шорсткості та рельєфу, що значно впливає на взаємодію рідин з поверхнею.

Для пояснення взаємодії рідин з реальними поверхнями та оцінки їх поверхневої енергії використовують моделі Венцеля та Кассі–Бакстера. У моделі Венцеля рідина повністю затікає у нерівності чи западини рельєфу [2], тоді як модель Кассі–Бакстера демонструє ефект, коли лише вершини рельєфу змочуються водою, а основна площа пор захищена від змочування повітряною подушкою [3]. Комбінація великої площі контакту з повітрям і малої площі з самою поверхнею сприяє утворенню надзвичайно гідрофобної структури. Взаємодія краплі води з поверхнями за моделями Юнга, Венцеля та Кассі–Бакстера наведена на рис. 1.

В природі у стані супергідрофобності знаходяться листя лотосу, за що явище високої гідрофобності називається “ефектом лотосу” [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** *Практичні переваги гідрофобних покриттів.* Завдяки низькій енергії адгезії води з поверхнею гідрофобні матеріали демонструють низку корисних технологічних ефектів. Зокрема, вони забезпечують самоочищення покриттів, сповільнюють утворення льоду, та можуть підвищувати антикорозійну стійкість композиту.

У роботі [5] автори узагальнили сфери застосування гідрофобних покриттів і основні переваги від їх використання, а саме:

– Для автомобільної, будівельної галузі та галузі сонячної енергетики основною перевагою виступають самоочищувальні властивості покриттів. Зокрема, для сонячної енергетики це стосується покриття фотоелектричних елементів, самоочищення якого захистить від скупчення бруду і втрати ККД; для автомобільної – усунення запотівання скла і захист корпусу від корозії.

– Для суднохідної галузі перевагами є захист від корозії та зменшення супротиву воді.

– Для авіаційної галузі основна перевага полягає у захисті від утворення льоду.

Попри всі переваги водовідштовхувальних покриттів, до них висувають жорсткі вимоги, які визначають можливість застосування таких матеріалів в конкретній галузі та чи буде економічно доцільною відмова від традиційних рішень.

Тому автори у роботі [5] наводять основні вимоги до водовідштовхувальних покриттів у різних сферах застосування, головною з яких є стійкість до абразивної дії та УФ опромінення, у якості покриття для автомобільного скла чи фотоелектричних елементів сонячних батарей вимагається насамперед прозорість; галузь водного транспорту вимагає стійкості до водопоглинання, архітектурна галузь – вогнезахисту та теплоізоляції.

*Фторполімерні зв'язуючі як галузевий стандарт.* У дослідженнях водовідштовхувальних покриттів поширеною практикою залишається розробка і використання фтор-модифікованих зв'язуючих і наповнювачів, оскільки вони надають кінцевому композиту низьку поверхневу енергію та високі експлуатаційні показники.

Прикладом синтезу зносостійкого супергідрофобного покриття є робота [6], де у якості зв'язуючого застосовано фторетилен-вінілєтерову (FEVE) емульсію, а у якості модифікатора поверхні наповнювача – 1H, 1H, 2H, 2H-перфтородецилтрихлоросилан (FDTS). Покриття формували шляхом послідовного наповнення шарів суміші емульсії FEVE і модифікованого FDTS нанокремнезему, у результаті чого утворювалася просторова сітчаста структура. Отриманий матеріал продемонстрував виражену супергідрофобність і високу зносостійкість: кут змочування водою становив  $\approx 165^\circ$ , кут скочування –  $< 10^\circ$ , причому ці характеристики зберігалися навіть після 600 циклів стирання на абразиві. Про високий потенціал використання FEVE у якості плівкоутворювача свідчить великий кут змочування плівки водою. З доступних джерел він варіюється від  $85^\circ$  до  $120^\circ$  [7, 8].

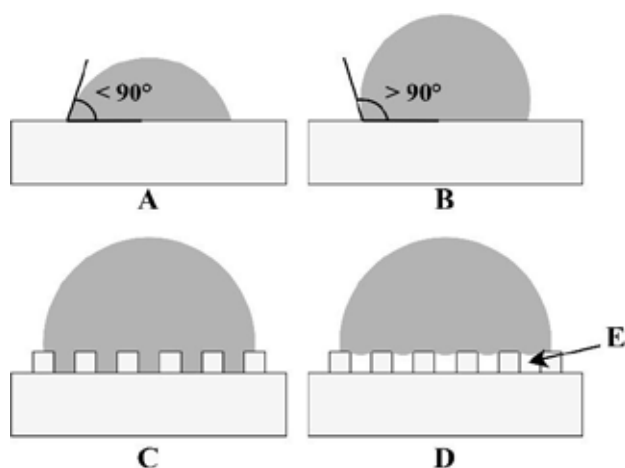


Рис. 1. Схематичне зображення змочення поверхонь водою за моделями Юнга (А – гідрофільна поверхня; В – гідрофобна), Венцеля (С) та Кассі–Бакстера (D; де Е – заповнені повітрям пори)

Високі експлуатаційні характеристики політетрафторетилену (PTFE) роблять його дуже перспективним для використання в якості зв'язуючого для супергідрофобних покриттів, зокрема у формі водної дисперсії. Для плівки чистого PTFE кут змочування за даними [9] складає  $\approx 108^\circ$ , однак для плівок на основі водоемульсійного PTFE цей показник може бути дещо нижчим через присутність емульгаторів. Водночас правильний підбір рецептури та режимів формування плівки, забезпечує формування покриттів з надзвичайно високими водовідштовхувальними властивостями. Доказом чого може бути робота [10], де досліджено покриття отримане на основі водної емульсії PTFE з наповнювачем у вигляді нанокompatиту MgO і вуглецевих нанотрубок, з фосфатною сіткою у якості зв'язуючого шару між ними. Кут змочування водою отриманого покриття складає  $\approx 162^\circ$ , а кут скочування  $< 6,5^\circ$ . Покриття показало надзвичайно високі експлуатаційні характеристики: після 1000 циклів Табер тесту з навантаженням 500 г і фракцією сітки у 1000, кут змочування знизився незначно і складав  $\approx 151^\circ$ , а для оголення підкладки знадобилося близько 127,5 тисяч циклів стирання. Дослідження демонструє, що покриття отримані з PTFE здатні забезпечувати не лише супергідрофобність, а й виняткову зносостійкість, задаючи міцну базу для подальшого практичного використання.

*Екологічні виклики та цільові характеристики безфторних систем.* Виняткова хімічна та біологічна стійкість пер- та поліфторалкільних речовин зумовлює їхню акумуляцію та тривалу присутність у довкіллі; це призводить до зростання екологічних і токсикологічних ризиків PFAS. Посилення регуляторної уваги до цих сполук в ЄС та США створюють стійкий запит на безфторні альтернативи, сумісні з «зеленою» трансформацією хімічної промисловості [11, 12]. На глобальному рівні окремі PFAS сполуки включаються до механізмів контролю Стокгольмської конвенції [13].

З огляду на екологічність, сучасні нормативи вимоги спрямовані на мінімізацію або повне вилучення токсичних компонентів, зокрема органорозчинних плівкоутворювачів та фторовмісних добавок зі складу хімічної продукції, зокрема водовідштовхувальних покриттів. При цьому критично важливим залишається збереження високої механічної стійкості та їх УФ-стабільності. Реалізація цих вимог можлива завдяки поєднанню таких механізмів:

- зниження вільної поверхневої енергії плівкоутворювачів та наповнювачів за рахунок їх моди-

фікації вуглеводневими, силосановими або восковими фрагментами;

- створення ієрархічного мікро- та нанорельєфу, що забезпечує існування стану Касі–Бакстера;

- формування гібридних або багатошарових структур із функціональним розділенням адгезії та гідрофобності;

- імплементація у матриці самовідновлювальних механізмів, що будуть здатні регенерувати механічні та гідрофобні властивості покриття після зовнішньої руйнівної дії.

**Постановка завдання.** Метою статті є узагальнення сучасних методів створення екологічних, ресурсоефективних, адаптованих до реальних умов експлуатації гідрофобних і супергідрофобних покриттів, що не містять токсичних розчинників і фторованих органічних сполук; а також аналіз основних підходів до створення гідрофобних полімерних матриць та визначення їх переваг та недоліків.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- систематизувати безфторні хімічні платформи та технологічні маршрути отримання покриттів;

- проаналізувати внесок ієрархічної мікро- та нанощорсткості й архітектури поверхні у реалізації станів Венцеля та Касі–Бакстера;

- порівняти підходи за основними експлуатаційними показниками (водовідштовхування, довговічність, абразивна стійкість, УФ-стабільність, антиобмерзання) та екологічними критеріями (ЛОО, небезпечні реагенти, ресурсомісткість);

- визначити обмеження масштабування й перспективні напрямки подальших досліджень для підвищення стабільності властивостей у реальних умовах експлуатації.

**Виклад основного матеріалу.** Силосанова модифікація водних дисперсій полімерів. Одним із рішень забезпечення вимог екологічності є використання силікон-модифікованих водоемульсійних зв'язуючих, що не містять токсичних органічних розчинників. Присутність силосанових ланцюгів у структурі плівкоутворювача забезпечує вбудовану гідрофобність покриття на рівні полімерної матриці, завдяки чому вплив гідрофільних емульгаторів і полярних функціональних груп значно послаблюється або стає практично непомітним. Автори у роботі [14] провели синтез акрилатно-поліметилсилосанової емульсії у дві стадії задля отримання “core-shell” структури частинок полімеру. На першій стадії відбувся синтез

ядра частинки, стирол–акрилового кополімеру. Окремо від основного процесу з циклічного та аліфатичного силоксанів з реакцією відкриття циклу був отриманий олігомер, що має змогу вступати у реакцію кополімеризації з акрилатними мономерами через винільну групу (рис. 2).

На другій стадії відбувалося формування оболонки частинки: до стирол–акрилової емульсії додали залишок мономерів та силоксановий олігомер. В результаті полімеризації була отримана дисперсія, що складалася з стирол–акрилового ядра, та стирол–акрил–силоксанової оболонки.

Плівка, утворена з даного полімеру показує значне покращення водостійкості в порівнянні з плівкою немодифікованого стирол – акрилату, а саме спостерігається зменшення поглинання води з 9,3% до 1,7%; підвищення кута змочування –

з 76,3° до 96,7°. Емульсія не містить органічних розчинників, що відкриває можливості до застосування її у екологічних гідрофобних покриттях.

В роботі [15] було синтезовано водну поліуретанову емульсію з використанням полідиметил-силоксану (PDMS) в якості одного з кополімерів. Наявність -ОН груп на кінцях ланцюга олігомеру PDMS надавало йому можливість бути інкорпорованим у основний ланцюг полімеру. Полімеризацію проводили багатостадійно у ацетоні, з подальшою його відгонкою і введенням води. Схема синтезу наведена на рис. 3.

Для аналізу впливу наявності PDMS у ланцюгу полімеру на властивості плівки, концентрація мономерів варіювалась – використовувалися співвідношення 100:0; 90:10; 80:20 масових частин PCL і PDMS.

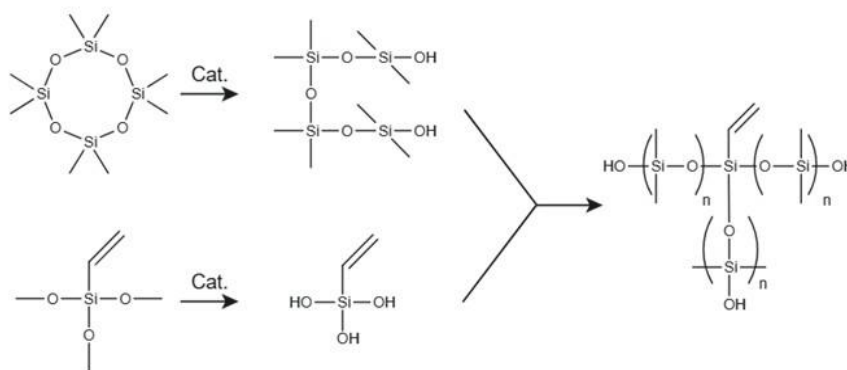


Рис. 2. Схема отримання силоксанового олігомеру. Адаптовано за [14]

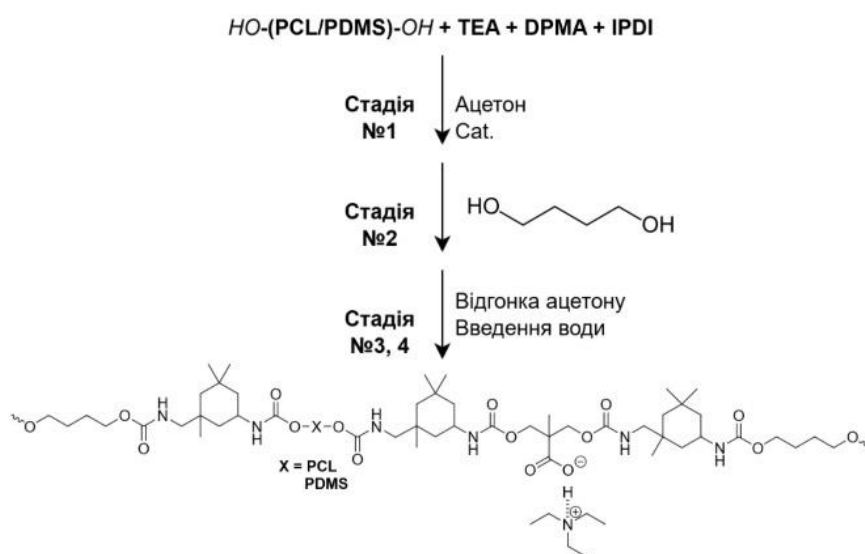


Рис. 3. Схема синтезу силоксан модифікованої поліуретанової емульсії, де PCL – полі-ε-капролактан, PDMS – полідиметилсилоксан, TEA – триетиламін, DPMA – 2,2 – біс(гідроксиметил) пропіонова кислота, IPDI – ізофорондіізоціанат; 1,4-бутандіол виступав у якості зшиваючого агента. Адаптовано за [15]

В результаті тестування отриманих полімерів, виявлено, що зразки силоксан-модифікованих емульсій, порівняно з немодифікованими, характеризуються суттєвим збільшенням розміру частинок:  $55 \pm 7$  нм для немодифікованої емульсії, для зразків із вмістом 10 і 20 частин PDMS –  $114 \pm 27$  та  $325 \pm 44$  нм. Зростання розміру частинок відобразилося на топографії сформованих полімерних плівок і призвело до підвищення їхньої шорсткості. Середня арифметична шорсткість Ra збільшилася з 0,47 нм для немодифікованої плівки до 2,26 нм для зразка з вмістом 10 частин PDMS і до 1,75 нм для зразка з вмістом 20 частин PDMS. Одночасно зріс і кут змочування: з  $71 \pm 5^\circ$  для зразка – контролю до  $80 \pm 2^\circ$  та до  $83 \pm 7^\circ$  для зразків з вмістом 10 і 20 частин PDMS. Законмірне підвищення шорсткості поверхні та кута змочування зі зростанням частки PDMS свідчить про ефективне покращення гідрофобних властивостей водоемульсійних поліуретанів.

Відомий механізм синтезу емульсій поліакрилатів та поліуретанів з інкорпорацією алкоксисиланів з метою їх подальшого гідролізу та самозшивання всередині частинок задля підвищення гідрофобності полімеру та підвищення його міцності [16]. Основною проблемою даного механізму є труднощі контролю процесу гідролізу, що призводить до проблем передчасної конденсації, низької стабільності емульсії при зберіганні. Автори у роботі [17] пропонують використання вінілтрис(β-метоксиетокси)силану A172 як вирішення перелічених проблем. Метоксиетокси група сповільнює гідроліз і утворення  $(-\text{Si}-\text{O}-)_n$  сітки в результаті утворення стеричного бар'єру для молекул води; крім того вона підвищує розчинність силану у воді, що призводить до гомогенного розчинення і більш контрольованого синтезу.

Використовуючи A172 була синтезована силан-модифікована водна поліуретанова емульсія у дві стадії. Перша стадія включала в себе синтез поліуретану з толуолдіізоціанату (TDI) і полієфірдіолу (DL). Після отримання діізоціанатного олігомеру покроково додавалися 2,2-біс(гідроксиметил)пропіонова кислота (DPMA), 1,4-бутандіол (BDO), гідроксиетилакрилат (HEA), триетиламін (TEA). В результаті диспергування у воді синтезованого олігомеру, отримана емульсія полімеру, що мав на кінцях ланцюгів вінільні групи. На другій стадії до емульсії були додані акрилатні мономері, стабілізуючі добавки і силан A172. В результаті контрольованої полімеризації була отримана силан-модифікована поліуретано-акрилатна

водна емульсія. Полімер всередині частинок був зшитий як за допомогою ТМРТА так і силаном A172 через  $(-\text{Si}-\text{O}-)_n$  зв'язки. В результаті тестування отриманих з емульсії плівок було виявлено, що зі збільшенням вмісту силану водопоглинання плівки зменшилося з  $\approx 20\%$  до  $\approx 11\%$ , кут змочування збільшився з  $71,33^\circ$  до  $100,33^\circ$  для зразків з 0 мас.% і 20 мас.% силану відповідно, що каже про ефективну модифікацію і значну гідрофобізацію полімеру, що поєднується з екологічністю через відсутність органічних розчинників.

Слід зазначити, що ключовим викликом при введенні силоксанових мономерів є складність керування їх сумісності. У роботах [15, 17], силоксанова модифікація призвела до різкого збільшення розміру частинок, а перевищення межі вмісту силоксану призводить до утворення коагуляту. Проте, перспективи використання таких полімерів виправдовують складність їх синтезу та демонструють конкурентоспроможність відносно фторовмісних систем.

*Воски та жирні кислоти як агенти зниження поверхневої енергії.* Природні та синтетичні воски (бджолиний, соєвий, парафіновий) і жирні кислоти та їх похідні (насамперед стеаринова кислота) формують окремий клас агентів зниження поверхневої енергії. У сучасних дослідженнях воски розглядають як екологічну альтернативу фторовмісним сполукам, вони ефективно знижують поверхневу енергію та легко інтегруються у органічні плівкоутворювачі. Однак для тривалої експлуатації такі сполуки необхідно комбінувати з полімерним каркасом або твердими частинками, через їх значну механічну вразливість [18, 19]. У роботі [20] авторами демонструється ефективність інкапсуляції бджолиного воску полімерною оболонкою, дозволяючи отримати стабільні емульсії воску – середній розмір частинок зменшується приблизно на 50%; стабільність емульсії значно покращується з 10 днів до 3 місяців зберігання, тобто такий підхід може вирішити проблему стабілізації воскової емульсії.

Для модифікації поверхні наповнювачів гідрофобних покриттів, зокрема частинок оксидів  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  ефективним є використання жирних кислот, наприклад, стеаринової; вони забезпечують ефективне зниження поверхневої енергії, їх вартість є найменша з-поміж інших гідрофобізуючих агентів. Як приклад ефективного використання стеаринової кислоти (STA) у якості гідрофобізуючого агента є робота [21], де авторами розроблено композицію PDMS-STA- $\text{TiO}_2$ , що наносилася на підкладку методом холод-

ного напилення. Отримане безфторне екологічне покриття зберігає супергідрофобні властивості після 5 годин УФ-опромінення; витримало до 8 циклів абразивної дії наждачним папером зернистістю 240 під навантаженням у 200 г, та є стійким до дії рідин діапазону рН від 1 до 13.

*Використання наповнювачів для створення супергідрофобності через утворення ієрархічної структури поверхні.* У роботі [22] автори отримали супергідрофобне покриття на основі водної емульсії Silres BS 4004, що є сумішшю силанів і силоксанів, які після нанесення на підкладку здатні гідролізуватися. Для плівки чистого полімеру на гладкій підкладці зафіксовано кут змочування у  $92^\circ$ , що підтверджує вроджену гідрофобність плівкоутворювача. Супергідрофобне покриття було отримано шляхом диспергування наночастинок  $\text{SiO}_2$  (середнього діаметру 7 нм) у емульсії Silres BS 4004 і воді. Встановлено, що покриття набувало супергідрофобних властивостей при вмісті  $\text{SiO}_2$  у 1 мас.% і більше. При цьому кут змочування водою становив  $165^\circ$ , а кут скочування був меншим за  $5^\circ$ .

В іншому дослідженні [23] для виготовлення супергідрофобного вододисперсійного покриття автори використали силікон-модифіковану поліуретанову водну емульсію RF-608. Плівка полімеру мала кут змочування  $\approx 92^\circ$ . Покриття формували методом розпилення на алюмінієву пластину дисперсії, яка складалася з RF-608, етанолу та гідрофобізованого  $\text{SiO}_2$  з розміром частинок 30–70 нм. Перед нанесенням суміш додатково піддавали ультразвуковій гомогенізації для рівномірного розподілу наповнювача.

Встановлено, що найкращі властивості має покриття, що містить 30 масових частин  $\text{SiO}_2$  на 100 масових частин емульсії; кут змочування композиції  $\approx 154,4^\circ$ , кут скочування  $\approx 8^\circ$ ; середня шорсткість складала 59,89 нм. Важливо, що саме цей варіант зберіг супергідрофобні властивості після циклу абразивного впливу, тоді як композиції з меншим (10, 20 мас. ч.) або більшим (40 мас. ч.) вмістом  $\text{SiO}_2$  демонстрували гіршу стійкість. Це вказує на важливість підбору оптимального рівня наповнення, який забезпечить баланс між достатньою гідрофобністю поверхні та її зносостійкістю.

Оцінюючи потенціал наповнювачів природного походження, автори [24] запропонували у якості функціонального компонента наноцелюлозу (CNC), модифіковану PDMS для формування супергідрофобного покриття. Як плівкоутворювач використовували водоемульсійний поліуретан.

Порошок гідрофобізованої наноцелюлози диспергували у водній полімерній матриці, а необхідну поверхневу шорсткість забезпечили механічним шліфуванням.

Плівки з вмістом 10 мас.% CNC після 10 циклів шліфування досягли кута змочування  $> 150^\circ$  та кута скочування  $< 5^\circ$ , механічна обробка дозволила оголити гідрофобні ланцюги PDMS та створити шорстку структуру, необхідну для стану Касі–Бакстера. Також, введення модифікованого CNC суттєво підвищило механічні характеристики плівки: межа міцності на розрив зросла з 20,6 МПа для немодифікованої системи до 50,0 МПа для гідрофобізованої. Дана робота демонструє перспективність використання матеріалів рослинного походження у супергідрофобних покриттях.

Підсумовуючи наведені результати, можна стверджувати, що введення функціональних наповнювачів у полімерні матриці є одним із ефективних підходів до формування супергідрофобних поверхонь без залучення токсичних органічних розчинників та фторвмісних компонентів. Отримані дані показують, що вирішальним чинником у створенні супергідрофобних покриттів є синергія між хімічною природою зв'язуючого і модифікатора частинок, які задають базову гідрофобність, і геометричними параметрами наповнювачів, які створюють необхідну ієрархічну шорсткість.

*Двокомпонентні системи.* Альтернативним способом подолання низької механічної міцності та схильності до водопоглинання у безфторних і, особливо, вододисперсійних покриттях є застосування двокомпонентних здатних до зшивання плівкоутворювачів, таких як епоксидні полімери. Завдяки формуванню щільної тривимірної полімерної сітки такі матеріали істотно зменшують або практично усувають водопоглинання; підвищена механічна стійкість і хімічна інертність зшиті матриці забезпечують кращу довговічність та експлуатаційну надійність покриттів.

Так у роботі [25] запропоновано технологічне рішення по створенню супергідрофобних механічно стійких покриттів на основі двокомпонентної епоксидної смоли E51. Як наповнювачі використано  $\text{MgO}$  та  $\text{нано-TiO}_2$  у співвідношенні 5 до 1, а роль гідрофобізатора виконувала стеаринова кислота. Дисперсію отримували шляхом простого змішування усіх складових суміші в одному реакторі з додаванням ацетону у якості розчинника. Покриття наносили на підкладку зануренням і розпиленням.

Покриття демонструвало кут змочування водою  $\approx 153^\circ$ , кут скочування  $\approx 1^\circ$ ; зберігало

супергідрофобні властивості після 30 циклів абразивної дії під навантаженням 200 г з зернистістю абразиву 1000. Під дією УФ-опромінення потужністю 20 Вт впродовж 12 годин поверхня втрачала гідрофобність і ставала практично повністю гідрофільною (кут змочування  $\approx 0^\circ$ ), що автори пов'язують із руйнуванням полімерної матриці і стеаринової кислоти.

Виконання абразивного стирання пошкодженого покриття видаляє деградований внаслідок УФ опромінення шар, формує шорсткість і «відкриває» новий гідрофобний шар із наповнювачем та молекулами стеаринової кислоти, завдяки тому що модифікований наповнювач присутній по всьому об'єму композиту. У результаті супергідрофобні властивості відновлюються, і кут змочування знову досягає  $\approx 153\text{--}155^\circ$ . Завдяки властивості до легкого відновлення супергідрофобності, дане покриття можна вважати дуже технологічним і ресурсоефективним рішенням проблеми вразливості шорсткого поверхневого шару.

Дослідники у роботі [26] отримали супергідрофобне покриття з використанням водоемульсійної епоксидної смоли F0716 А з відповідним отвержувачем F0716 В. У якості наповнювача використовували наночастинки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що були попередньо гідрофобізовані гексадецилтриметоксисиланом (HDTMS) у розчині етанолу. Гідрофобізований нанопорошок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  диспергували в епоксидній матриці, суміш нанесли на залізню пластину методом напилення.

За результатами випробувань встановлено, що оптимальне поєднання характеристик досягається за співвідношення епоксиду до наповнювача у 1,5. Для цього зразка кут змочування водою становив  $\approx 151^\circ$ , а кут скочування  $\approx 4,9^\circ$ . Виявлено, що при збільшенні частки епоксидної смоли покриття втрачає супергідрофобні властивості: кут змочування знижується до  $\approx 130^\circ$ .

Композиція зберігає супергідрофобні властивості після 90 циклів абразивного стирання (абразивна сітка зернистістю 2000, навантаження 100 г); 120 циклів тестування на відшарування клейкою стрічкою (3M Scotch, прокатування навантаженням 50 г). Окрім високої абразивної стійкості покриття показало високий захист від корозії для металевієї підкладки. Корозія підкладки знизилась на 99,9 % в порівнянні з незахищеною металевою пластиною.

Автори у роботі [27] продемонстрували перспективність використання агровідходів (золи кукурудзяної соломи), в якості сировини для синтезу гідрофобізуючого агента – спіроцикліч-

ного алкоксисилану (SAS). Синтез модифікатора проводили шляхом реакції золи з 2-метил-2,4-пентандіолом за температури  $180^\circ\text{C}$  протягом 48 годин. Покриття було отримано шляхом введення синтезованого SAS у спиртовий розчин епоксидної смоли разом із отверджувачем.

Підбираючи вміст SAS у матриці, автори визначили оптимальне його значення на рівні 30 мас.%. За цих умов покриття характеризується кутом змочування водою  $\approx 110^\circ$ . Ключовою перевагою стала виняткова механічна стійкість: покриття витримувало понад 1600 циклів абразивного стирання без втрати гідрофобних властивостей.

Наведені вище дослідження демонструють переваги підходу інтеграції модифікованого наповнювача в об'ємі полімерної матриці: у такому разі гідрофобні властивості концентруються не лише на поверхні, а і структурою покриття загалом, що відкриває потенціал відновлення покриття, наприклад, шліфуванням [24].

Водночас у практиці часто виникає потреба у простішому технологічному рішенні, яке дозволяє сформувати супергідрофобний рельєф переважно на верхньому шарі, не ускладнюючи технологію створення просторового наповнення. Саме цю задачу вирішують методи поверхневого формування гідрофобності, де функціональна шорсткість і низька поверхнева енергія концентруються тільки в поверхневій зоні матриці, що реалізується нанесенням наповнювачів на напівотверджену поверхню плівкоутворювача. Частинки розпилюють або присипають зверху, що дозволяє надійно закріпити їх у верхньому шарі матриці завдяки чому формується необхідна мікро- та наношорсткість.

Так у роботі [28] супергідрофобне покриття отримано шляхом розпилення порошку  $\text{TiO}_2$  розміром частинок 25 нм, попередньо гідрофобізованого стеариновою кислотою, на поверхню напівотвердженого епоксидного полімеру з подальшим отвердженням композиції при температурі  $60^\circ$ .

Покриття демонструє супергідрофобні характеристики – кут змочування водою складав  $\approx 158,6^\circ$ , кут скочування  $\approx 4^\circ$ . Через специфіку формування шару зносостійкість системи виявилася обмеженою. Після абразивного впливу супергідрофобність втрачається й не відновлюється: зразок витримував абразивну дію 200 грамів навантаження шліфувального паперу зернистості 400 (дистанцією дії – 9 сантиметрів) та 9 циклів відривання скотчем до втрати супергідрофобності. Порівнюючи цей метод (напилення на поверхню) з об'ємним введенням наповнювача [25, 26], спо-

стерігається значно менша механічна стійкість через слабе закріплення частинок у поверхневому шарі.

Метод створення супергідрофобних покриттів нанесенням наповнювача на напівотверджену поверхню ефективний не лише для двокомпонентних епоксидних систем. Так, у роботі [29] супергідрофобне покриття отримали шляхом розпилення діатоміту, попередньо гідрофобізованого гексадецилтриметоксисиланом (HDTMS) та тетраетоксисиланом (TEOS) на напівотверджену плівку водної поліуретанової емульсії. Сформована поверхня демонструвала супергідрофобні властивості: кут контакту з водою становив  $\approx 168,1^\circ$ , кут скочування  $\approx 4,9^\circ$ . Механічну стійкість оцінювали дією струменя води під тиском 25–50 кПа протягом 30 хв, і в цих умовах покриття зберігало супергідрофобні властивості. Водночас автори відзначили, що найбільш руйнівним фактором для системи виявився лужний вплив насиченого розчину NaOH.

*Самовідновлювальні гідрофобні покриття.* У роботі [30] представлено самовідновлювальне супергідрофобне покриття на основі полісечовини з динамічними дисульфідними зв'язками та гідрофобізованих стеариновою кислотою наночастинок  $\text{TiO}_2$ . Це рішення демонструє перехід до матеріалів, здатних частково компенсувати руйнування поверхні за рахунок хімічно вбудованих динамічних зв'язків.

Покриття отримували у три етапи: на підкладку наносили шар синтезованого полімеру, посипали порошком гідрофобізованого  $\text{TiO}_2$  і отверджували композицію за температури  $80^\circ\text{C}$  протягом 2-х годин. Таким чином, наночастинки були закріплені на поверхні матриці.

Покриття демонструвало виражену супергідрофобність: кут змочування водою становив  $\approx 158^\circ$ , кут скочування  $\approx 1,5^\circ$ . Визначальною особливістю композиту була здатність до термічного

самовідновлення, зумовлена обмінними реакціями дисульфідних зв'язків у плівкоутворювачі. Після механічного пошкодження зразок нагрівали до  $80^\circ\text{C}$  протягом 90 хв, унаслідок чого супергідрофобні характеристики ушкодженої ділянки відновлювалися. Схему механізму самолікування наведено на рис. 4.

Отже, застосування двокомпонентних систем дозволяє вирішити проблему механічної слабкості вододисперсних покриттів шляхом формування щільної зшитої матриці. Найбільш перспективними шляхами отримання гідрофобних покриттів є перехід від поверхневого напилення наповнювача до об'ємного наповнення та впровадження механізмів самолікування.

*In situ та золь-гель системи.* Під терміном *in-situ* розуміють метод, при якому формування плівкоутворюючої матриці відбувається безпосередньо на поверхні підкладки вже після нанесення композиції. Отвердження таких покриттів забезпечується хімічним зшиванням низькомолекулярних складових у єдину просторову сітку.

Найбільш поширеним різновидом такої системи є золь-гель процес. Механізм його дії полягає у переході системи зі стану золю (колоїдного розчину рідких прекурсорів) у стан гелю (твердої тривимірної сітки). У контексті гідрофобних покриттів цей процес зазвичай включає, наприклад, гідроліз алкоксисиланів з утворенням активних силанольних груп  $-\text{Si}-\text{OH}$  та їх подальшу поліконденсацію. Результатом є формування полімерного каркасу; на прикладі гідролізу алкоксиланів таким каркасом виступають ланцюги  $(-\text{Si}-\text{O}-)_n$  [31].

Автори у роботі [32] дослідили вплив довжини ланцюгів алкоксиланів на кінцеві властивості супергідрофобного покриття. Для цього активовані галузитні нанотрубки (A-Hal) модифікували різними видами алкоксисиланів у присутності тетраетоксисилану (TEOS) та порівнювали три

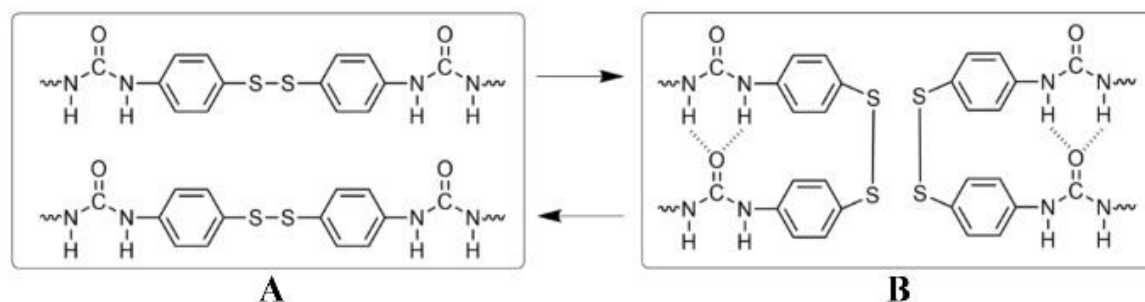


Рис. 4. Механізм самолікування покриття з полісечовиною у якості плівкоутворювача

A – непошкоджене покриття, B – покриття, що зазнало пошкодження. Адаптовано за [30].



реагенти з різною довжиною вуглецевого ланцюга: метилтриетоксисилан (MTES, C1), октилтриетоксисилан (OTES, C8) і гексадецилтриметоксисилан (HDTMS, C16).

Отримані результати демонстрували чітку залежність між довжиною аліфатичного радикалу та ефективністю гідрофобізації: покриття на основі MTES і OTES не забезпечували супергідрофобного стану, тоді як використання HDTMS давало змогу досягти високих значень кута змочування – до  $\approx 159^\circ$  на керамічній та  $\approx 156^\circ$  на мармуровій підкладках. Водночас збільшення довжини ланцюга супроводжувалося зниженням механічної стійкості: зразки з HDTMS показали найменшу твердість у випробуваннях на пошкодження олівцем за ISO 1518-2:2019 [33]  $< 6B$  та прикладеної сили за ISO 15184:2020 [34] у 0,1 Н; тоді як покриття з MTES виявилися міцнішими (3В та 0,2 Н). Автори пояснюють м'якість покриття з HDTMS тим, що довгі аліфатичні ланцюги діють подібно пластифікаторам, знижуючи щільність упаковки полімерно-неорганічної матриці та опір пошкодженням.

Прикладом одностадійного золь-гель підходу до отримання супергідрофобного покриття є робота [35]. В дослідженні отримали супергідрофобне покриття на основі поліфеніленсульфідної (PPS) матриці та модифікованих наночастинок ZnO. Гідрофобізований стеариновою кислотою ZnO ввели у розчин PPS у етанолі; покриття отримали методом занурення мідної пластинки у дисперсію з подальшим отвердженням при температурі  $120^\circ\text{C}$ . Отримане покриття демонструвало супергідрофобні властивості: кут змочування водою складав  $\approx 164,7^\circ$ , кут скочування  $\approx 4,0^\circ$ . За допомогою молекулярно-динамічного моделювання автори довели, що карбоксильні групи стеаринової кислоти вступають у реакцію з ZnO, а у отвердженому покритті орієнтують аліфатичні ланцюги назовні, створюючи відштовхувальну дію до крапель води.

У роботі [36] розглядалася можливість отримання практичних водовідштовхувальних золь-гель покриттів на основі водної суміші алкоксиланів як антирефлексивних, світлопропускаючих самоочисних шарів, зокрема, для використання у якості захисного покриття для сонячних батарей. Для створення таких покриттів автори використали поліетиленгліколь (PEG) у якості добавки пороутворювача.

Формування покриття проводили у три стадії. Спочатку отримували гель шляхом гідролізу тетраетоксисилану (TEOS). Далі до золь-гель

системи вводили PEG, суміш перемішували та наносили на підкладку. PEG виконував роль пороутворювача – після прокалювання матриці при температурі  $550^\circ\text{C}$  протягом 1 години він вигорав, залишаючи пористу структуру. Сформований гідрофільний шар надалі гідрофобізували шляхом осадження продуктів випарування суміші PDMS і TEOS.

Покриття отримували використовуючи PEG різної молекулярної маси. В результаті виявлено, що характеристики кінцевого покриття істотно залежать від молекулярної маси PEG – найкращий компроміс між властивостями досягали при використанні PEG з молекулярною масою 1000, при цьому світлопропускання плівки становило 96,44 %, механічна стійкість за ISO 1518-2:2019 [33] відповідала твердості  $> 4H$ , а кут змочування водою досягав  $124^\circ$ . Покриття, що було отримано з використанням PEG з молекулярною масою 4000, демонструвало дещо меншу пропускну здатність (95,90 %), гіршу стійкість до тесту на здирання олівцем ( $> 1H$ ), проте мало значно вищу гідрофобність – кут змочування водою складав  $145^\circ$ , кут скочування –  $5^\circ$ .

Автори пояснюють відмінності у властивостях впливом молекулярної маси (довжини ланцюга) PEG на морфологію покриття після термічної обробки. Під час прокалювання PEG руйнується і виконує роль пороутворювача: чим довші його ланцюги, тим крупніші та глибші пори залишаються в золь-гель шарі, а отже зростає шорсткість поверхні. Водночас збільшення пористості призводить до зниження механічної міцності, оскільки силоксановий каркас стає менш щільним і легше пошкоджується. Дослідження демонструє можливість досить точного керування структурою і практичних властивостей покриття.

In-situ та золь-гель рішення вирізняються високою гнучкістю в керуванні формування будови покриттів. На відміну від традиційних систем, існує можливість цілеспрямовано добирати прекурсори та умови синтезу, формуючи матриці з заданою пористістю, шорсткістю й функціональністю відповідно до вимог кінцевого використання.

**Висновки.** Систематизація сучасних стратегій створення безфторних екологічних покриттів показує, що основною перешкодою для заміни фторовмісних композитів є їх низька абразивна стійкість, потенціал до набухання у воді. Встановлено, що хоча силоксани, воски та жирні кислоти ефективно знижують поверхневу енергію,

просте поверхнєве закріплення наповнювачів не забезпечує необхідної міцності і довговічності. Аналіз досліджень свідчить, що найбільш перспективними шляхами подолання цієї проблеми є об'ємне модифікування полімерних матриць, впровадження механізмів самолікування та вико-

ристання золь-гель технологій. Саме такі підходи дозволяють нівелювати проблеми крихкості поверхневого шорсткого шару та забезпечити необхідний баланс між екологічністю, високою гідрофобністю і тривалою експлуатаційною надійністю покриттів.

### Список літератури:

1. Wang S., Jiang L. Definition of Superhydrophobic States. *Advanced Materials*. 2007. Vol. 19, № 21. P. 3423–3424. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200700934>
2. Wenzel R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & engineering chemistry*. 1936. Vol. 28, № 8. P. 988–994. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50320a024>.
3. Cassie A.B. D., Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the faraday society*. 1944. Vol. 40. P. 546. DOI: <https://doi.org/10.1039/tf9444000546>.
4. Myronyuk O. Determination of critical surface tension of wetting of textured water-repellent surfaces. *Technology audit and production reserves*. 2023. Vol. 2, № 1(70). P. 10–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.277936>.
5. Recent progresses of superhydrophobic coatings in different application fields: an overview / Y. Bai et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, № 2. P. 116. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11020116>.
6. Waterborne superamphiphobic coatings with network structure for enhancing mechanical durability / W. Gu et al. *RSC advances*. 2022. Vol. 12, № 26. P. 16510–16516. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2ra02853k>.
7. Parker R., Blankenship K. Fluoroethylene vinyl ether resins for high-performance coatings. *ASM handbook, volume 5B: protective organic coatings* / ред. К. В. Tator. Materials Park, 2015. P. 89–95.
8. Water based durable superhydrophobic paint : пат. US 11578217 B2.
9. Nanoscale water contact angle on polytetrafluoroethylene surfaces characterized by molecular dynamics–atomic force microscopy imaging / J. Włoch et al. *Langmuir*. 2018. Vol. 34, № 15. P. 4526–4534. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00257>.
10. Robust waterborne superhydrophobic coatings with reinforced composite interfaces / D. Lin та ін. *ACS applied materials & interfaces*. 2020. Vol. 12, № 42. P. 48216–48224. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.0c14471>.
11. ECHA publishes updated PFAS restriction proposal. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fopow.2025.09.045>.
12. Possible ban on per- and polyfluoroalkyl substances in the EU. *Umweltbundesamt*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/press/pressinformation/possible-ban-on-per-polyfluoroalkyl-substances-in>.
13. PFASs under the stockholm convention. *Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants*. URL: <https://www.pops.int/Implementation/IndustrialPOPs/PFAS/Overview/tabid/5221/Default.aspx>.
14. Hybrid polysiloxane/polyacrylate/nano-SiO<sub>2</sub> emulsion for waterborne polyurethane coatings / W. Jiang et al. *Polymer testing*. 2019. Vol. 80. P. 106110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106110>.
15. Polydimethylsiloxane containing waterborne hydrophobic polyurethane coatings with good adhesion to metals: synthesis and characterization / A. Pérez Das Dorez et al. *Progress in organic coatings*. 2022. Vol. 162. P. 106564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106564>.
16. Karna N., Joshi G. M., Mhaske S. T. Structure-property relationship of silane-modified polyurethane: a review. *Progress in organic coatings*. 2023. Vol. 176. P. 107377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107377>.
17. Preparation and properties of hydrophobic polyurethane based on silane modification / Y. Ma et al. *Polymers*. 2023. Vol. 15, № 7. P. 1759. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071759>.
18. Bayer I. S. Superhydrophobic coatings from ecofriendly materials and processes: a review. *Advanced materials interfaces*. 2020. Vol. 7, № 13. P. 2000095. DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.202000095>.
19. Wax-integrated superhydrophobic coatings. *Advances in superhydrophobic coatings*. 2023. P. 84–108. DOI: <https://doi.org/10.1039/9781837670031-00084>.
20. Superhydrophobic coatings from beeswax-in-water emulsions with latent heat storage capability / S. Naderizadeh et al. *Advanced materials interfaces*. 2019. Vol. 6, № 5. P. 1801782. DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.201801782>.
21. A non-fluorinated superhydrophobic PDMS/STA/TiO<sub>2</sub> coating with photocatalysis and environmental stability properties by one-step cold spraying / Y. Zhao et al. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*. 2023. Vol. 676. P. 132285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132285>.
22. Karapanagiotis I., Chatzigrigoriou A., Manoudis P. N. Waterborne superhydrophobic coatings for the conservation of the cultural heritage. *Handbook of waterborne coatings*. 2020. P. 229–247. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814201-1.00010-x>.

23. Fabrication of superhydrophobic coating based on waterborne silicone-modified polyurethane dispersion and silica nanoparticles / H. Liu et al. *Polymers*. 2022. Vol. 15, № 1. P. 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15010022>.
24. Superhydrophobic film from silicone-modified nanocellulose and waterborne polyurethane through simple sanding process / X. Zhan et al. *International journal of biological macromolecules*. 2023. Vol. 232. P. 123431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123431>.
25. Si Y., Yang F., Guo Z. Bio-inspired one-pot route to prepare robust and repairable micro-nanoscale superhydrophobic coatings. *Journal of colloid and interface science*. 2017. Vol. 498. P. 182–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.03.063>.
26. Waterborne superhydrophobic coating with abrasion and corrosion resistant capabilities / G. Yang et al. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*. 2023. Vol. 664. P. 131170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131170>.
27. Fluorine-free and durable hydrophobic coating made with corn straw-derived silane modified epoxy resin / W. Liu et al. *BioResources*. 2023. Vol. T. 18, № 1. P. 2011–2023. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.2011-2023>.
28. Fluorine-free fabrication of robust self-cleaning and anti-corrosion superhydrophobic coating with photocatalytic function for enhanced anti-biofouling property / H. Li et al. *Surface and coatings technology*. 2022. Vol. 438. P. 128406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128406>.
29. Waterborne, non-fluorinated and durable anti-icing superhydrophobic coatings based on diatomaceous earth / H. Xie et al. *New journal of chemistry*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/d1nj01307f>.
30. Eco-friendly intrinsic self-healing superhydrophobic polyurea/TiO<sub>2</sub> composite coatings for underwater drag reduction and antifouling / J. Gao et al. *Progress in organic coatings*. 2023. Vol. 183. P. 107769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107769>.
31. Advances in sol-gel-based superhydrophobic coatings for wood: a review / Y. Wang et al. *International journal of molecular sciences*. 2023. Vol. 24, № 11. P. 9675. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24119675>.
32. Özcan Diker C., Duman O., Tunç S. Design and characterization of multicolor water-repellent coatings: impact of alkyl chain length on surface properties. *Applied clay science*. 2024. Vol. 262. P. 107626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107626>.
33. ISO 1518-2:2019. Paints and varnishes – Determination of scratch resistance. Part 2: variable-loading method.
34. ISO 15184:2020. Paints and varnishes – Determination of film hardness by pencil test.
35. One-step fabrication of self-cleaning superhydrophobic surfaces: a combined experimental and molecular dynamics study / X. Chen et al. *Surfaces and interfaces*. 2022. Vol. 31. P. 102022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102022>.
36. Preparation of hydrophobic antireflective SiO<sub>2</sub> coating with deposition of PDMS from water-based SiO<sub>2</sub>-PEG sol / Y. Zhu et al. *Applied surface science*. 2018. Vol. 457. P. 522–528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.177>.

## **Soldatenkov V.Yu., Melnyk L.I. MODERN STRATEGIES FOR THE DEVELOPMENT OF RESOURCE-EFFECTIVE FLUORINE-FREE ECO-FRIENDLY HYDROPHOBIC COATINGS**

*The paper systematizes modern strategies for creating resource-efficient, fluorine-free hydrophobic and superhydrophobic coatings, with an emphasis on combining sustainability, processability, and durability. Mechanisms of hydrophilicity and hydrophobicity are reviewed, including Wenzel and Cassie–Baxter models ; it is shown that the superhydrophobic state (contact angle > 150° and sliding angle < 10°) is formed through the combined effect of low surface energy and hierarchical micro- and nano-roughness in a model approximating the Cassie–Baxter state. The practical benefits of applying hydrophobic coatings are discussed. In particular, the most promising industries for their application include the automotive, energy, aerospace, construction, and maritime fields. It is highlighted that the main benefits of using hydrophobic coatings in these industries are: corrosion protection of vehicle bodies, anti-icing properties, and self-cleaning properties. The key requirements for hydrophobic coatings in these sectors are defined as: UV resistance, wear resistance and mechanical strength, transparency, and thermal stability. The relevance of the transition from fluorine-containing systems (PFAS) to fluorine-free alternatives is stated due to environmental risks and tightening regulatory restrictions. Fluorine-free solutions are summarized, including: siloxane modification of aqueous film-forming emulsions, core-shell systems, PDMS-modified polyurethanes, and alkoxysilane-based sol-gel systems; waxes and fatty acids as surface energy reducing agents; the use of fillers (SiO<sub>2</sub>, diatomite, nanocellulose, metal oxides) to form hierarchical structures and achieve a superhydrophobic state; two-component and self-healing systems, where a cross-linked matrix or dynamic bonds increase abrasion resistance and allow for the restoration*

*of the functional surface. The main requirements for fluorine-free coatings are formulated, indicating that architectures with bulk hydrophobicity and self-healing mechanisms are the most promising, supported by standardized testing of mechanical, UV, and chemical stability.*

**Keywords:** *fluorine-free coatings, hydrophobicity, superhydrophobicity, wetting contact angle, Wenzel and Cassie–Baxter states, hierarchical micro- and nano-roughness, sol–gel technologies.*

Дата першого надходження статті до видання: 17.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

# ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.641:664.664

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/39>**Данилюк І.П.**<https://orcid.org/0009-0005-3728-2157>Чернівецький торговельно-економічний інститут  
Державного торговельно-економічного університету**Струтинська Л.Т.**<https://orcid.org/0000-0001-5811-9766>Чернівецький торговельно-економічний інститут  
Державного торговельно-економічного університету

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ТА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЕЗГЛЮТЕНОВИХ БУЛОЧОК ДЛЯ ГАМБУРГЕРІВ НА ОСНОВІ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ СИРОВИНИ

У статті висвітлено технологію виробництва та досліджено показники якості функціональних безглютенових булочок для гамбургерів, розроблених на основі альтернативних видів борошна. Актуальність дослідження обумовлена зростанням поширеності целиакиї та глютенкової непереносимості, що зумовлює потребу у спеціалізованих продуктах харчування, а також підвищенням інтересом споживачів до функціональних і безпечних харчових виробів.

Метою дослідження було розробити рецептуру безглютенових булочок для гамбургерів із використанням альтернативних видів борошна, забезпечити стабільність структури тіста та визначити вплив функціональних компонентів на якість і харчову цінність виробів. В якості основних компонентів рецептури обрано рисове, гречане та кукурудзяне борошно, які відрізняються хімічним складом і технологічними властивостями, що дозволяє коригувати пористість і еластичність м'якушки. Для покращення газоутримувальної здатності тіста та формування стійкої еластичної структури застосовували псиліум.

Крім того, до рецептури введено насіння льону, насіння кунжуту, шрот насіння гарбуза та в'ялені томати з метою підвищення харчової та біологічної цінності виробів, зокрема вмісту білка, харчових волокон, мінералів і антиоксидантів. Проведено серію лабораторних досліджень, включаючи пробні заміси та випікання зразків із різними співвідношеннями альтернативних видів борошна та псиліуму. Булочки оцінювали за органолептичними, фізико-хімічними та структурно-механічними показниками, а також за харчовою та біологічною цінністю.

Результати досліджень показали, що оптимальне поєднання рисового (50 %), гречаного (30 %) та кукурудзяного борошна (20 %) у поєднанні з 5 % псиліуму забезпечує рівномірну пористість, еластичну структуру м'якушки, достатню формостійкість і приємні смако-ароматичні властивості виробів, що відповідають функціональному призначенню булочок для гамбургерів. Використання функціональних інгредієнтів дозволяє підвищити біологічну цінність продукту, збільшити вміст білка та харчових волокон, а також покращити засвоюваність і мікробіологічну стабільність.

Отримані результати підтверджують доцільність використання альтернативних видів борошна та структуроутворювальних компонентів у технології безглютенових булочок для гамбургерів. Практичне значення дослідження полягає у можливості впровадження розроблених рецептур у виробництво спеціалізованих харчових продуктів для споживачів із глютенковою непереносимістю.

**Ключові слова:** безглютенові булочки, альтернативні види борошна, псиліум, харчова цінність, функціональні інгредієнти.



**Постановка проблеми.** Сучасні тенденції розвитку харчових технологій спрямовані на створення продуктів функціонального призначення, адаптованих до потреб споживачів із харчовими непереносимостями, зокрема глютенною ентеропатією, алергічними реакціями та порушеннями обміну речовин. У цьому контексті особливу актуальність набуває розробка безглютенових хлібо-булочних виробів, які б поєднували безпечність, високу якість та належні споживні властивості.

Традиційні технології виробництва хлібо-булочних виробів ґрунтуються на використанні пшеничного борошна, що забезпечують формування пористої структури та характерних структурно-механічних і органолептичних показників виробів [1].

Розробка безглютенових хлібо-булочних виробів є актуальним напрямом сучасних харчових технологій, що зумовлено зростанням поширеності целиакії, глютенною ентеропатією, а також підвищеним інтересом споживачів до функціональних та спеціалізованих продуктів харчування [2]. Особливої уваги потребує розробка безглютенових виробів цільового призначення, зокрема булочок для гамбургерів, які повинні відповідати підвищеним вимогам до формостійкості, еластичності м'якушки, здатності утримувати начинку та зберігати споживчі властивості під час споживання.

Водночас відсутність глютену в рецептурах безглютенових виробів суттєво ускладнює формування пружної та стабільної структури тіста, що негативно позначається на структурно-механічних показниках готових виробів [3]. У зв'язку з цим актуальним стає дослідження якісних показників нових технологій функціональних безглютенових булочок для гамбургерів на основі альтернативної сировини, а також необхідності пошуку гідрокоолідів, здатних частково компенсувати структуроутворювальну функцію глютену.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання розробки безглютенових хлібо-булочних виробів широко висвітлюються у працях вітчизняних та зарубіжних науковців. Дослідження свідчать, що найбільш поширеними видами сировини для виробництва безглютенових хлібо-булочних виробів є рисове, кукурудзяне, гречане, соргове та бобове борошно, які відрізняються за хімічним складом, функціональними властивостями та впливом на якість готової продукції [4, 5].

Сучасні наукові публікації показують, що проблема виробництва якісних безглютенових хлібо-булочних виробів залишається однією з тех-

нологічних складових у харчовій індустрії через відсутність природної білкової матриці глютену, яка забезпечує структуру і еластичність тіста [6]. Огляд існуючих технологій вказує, що для досягнення прийнятних показників об'єму та текстури безглютенового хліба найчастіше використовують комбінацію різних видів безглютенового борошна, крохмалів, білкових добавок та функціональних компонентів, таких як гідрокооліди (наприклад, гідроксипропілметилцелюлоза – НРМС) або ферменти, які частково компенсують відсутність мережевої структури глютену [3].

Ряд досліджень зосереджений на оптимізації рецептур безглютенових хлібо-булочних виробів шляхом використання рисового, кукурудзяного та інших видів безглютенового борошна. Зокрема, автори відзначають, що рецептурні рішення, які включають комбінації безглютенових злакових та крохмалів разом з білковими компонентами і гідрокоолідами, дозволяють досягти об'єму  $\geq 3,5 \text{ см}^3/\text{г}$  і покращеної пористості м'якушки [7].

У вітчизняних дослідженнях також підкреслюється важливість детального вивчення технологічних властивостей безглютенових видів сировини, зокрема їх водопоглинальної здатності, власних цукрів, газоутворювальної здатності, які визначають поведінку тіста під час формування і випікання та впливають на якість готового продукту [8].

Окремий напрям сучасних досліджень – це включення до рецептур безглютенових виробів додаткових функціональних інгредієнтів, що підвищують їхню харчову цінність, наприклад, харчових волокон, білків рослинного походження або інших біологічно активних компонентів. Зокрема, у низці робіт обґрунтовано включення різних видів борошна, таких як сочевиця, амарант, борошно зеленої гречки, з метою поліпшення кислотно-лужного балансу, амінокислотного складу та загальної харчової цінності безглютенового хліба [9].

Хоча булочки для гамбургерів у науковій літературі менш представлені, існують приклади наукових та прикладних розробок технологій безглютенових булочок, включно з дослідженнями, присвяченими покращенню їх текстурно-механічних характеристик за допомогою різних видів сировини та функціональних добавок. Наприклад, технологія виробництва безглютенових булочок з кукурудзяного та рисового борошна доводить можливість отримання м'яких, пористих виробів із прийнятними органолептичними показниками, що підтверджує технологічний потенціал альтер-

нативних рецептур у порівнянні з традиційними продуктами [10]

Аналіз сучасних наукових джерел свідчить, що більшість досліджень у галузі виробництва безглютенових хлібобулочних виробів зосереджена переважно на технологіях безглютенового хліба та хлібців, тоді як питання створення безглютенових булочок функціонального призначення, зокрема для гамбургерів, залишаються недостатньо висвітленими. У науковій літературі наявні окремі відомості щодо застосування альтернативних видів борошна та функціональних інгредієнтів, однак комплексні дослідження, спрямовані на формування стабільної структури, еластичності м'якушки та формостійкості безглютенових булочок для гамбургерів, є обмеженими.

Поряд із цим, аналіз асортименту роздрібної торгівлі демонструє недостатню представленість безглютенових булочок для гамбургерів вітчизняного виробництва, а наявні імпортовані аналоги характеризуються високою вартістю та не завжди відповідають очікуванням споживачів за органолептичними показниками [11]. Це зумовлює необхідність розробки рецептур безглютенових булочок із використанням альтернативних видів борошна та структуроутворювальних компонентів, здатних забезпечити належну якість готових виробів.

Таким чином, проведення досліджень, спрямованих на обґрунтування рецептурних і технологічних рішень для виробництва безглютенових булочок для гамбургерів з оптимальними показниками якості та харчової цінності, є актуальним і доцільним з наукової та практичної точок зору.

**Постановка завдання.** *Метою статті є розробка технології функціональних безглютенових булочок для гамбургерів на основі альтернативних видів борошна та оцінка їхніх органолептичних, структурно-механічних, фізико-хімічних показників і харчової та біологічної цінності.*

*Об'єктом дослідження є технологія виробництва функціональних безглютенових булочок для гамбургерів на основі альтернативних видів борошна.*

*Предметом дослідження є вплив альтернативних видів борошна (рисового, гречаного, кукурудзяного), гідроколіду псиліуму на органолептичні, фізико-хімічні, структурно-механічні показники якості, а також харчову і біологічну цінність безглютенових булочок для гамбургерів.*

Для виготовлення дослідних зразків безглютенових булочок для гамбургерів використовували такі види сировини:

- борошно рисове згідно з ТУ У 10.6-3195815894-001:2017 ТМ «Хіт продукт»;
- борошно гречане згідно з ТУ У 15.6-2110615276-002:2010, ТМ «Органік Еко Продукт»;
- кукурудзяне борошно згідно з ДСТУ ISO 22000-2019, ТОВ «Ландгрейн»;
- псиліум (лушпиння насіння подорожника) згідно ТУ У 15.8-32706692-010:2007, ТМ Golden Farm ;
- інша сировина (вода, насіння льону, насіння кунжуту, шрот насіння гарбуза, в'ялені помідори, дріжджі сухі хлібопекарські, сіль кухонна, оливкова олія) згідно вимог чинних нормативних документів та у межах терміну придатності.

Контрольним зразком слугувала булочка для гамбургерів, виготовлена відповідно до вимог [12]. Дослідними зразками – безглютенові булочки для гамбургерів, виготовлені із використанням суміші альтернативних видів борошна, насінням льону, кунжуту, шроту насіння гарбуза та в'ялених помідорів.

Органолептичну оцінку якості готових булочок проводили відповідно до вимог [13] за показниками зовнішнього вигляду, форми, стану поверхні, кольору м'якушки, пористості, смаку та аромату. Дослідження фізико-хімічних показників здійснювали згідно з [14] через 4 години після випікання виробів.

Питомий об'єм хлібобулочних виробів та формостійкість визначали за загальноприйнятими методиками, рекомендованими для оцінки якості хлібобулочних виробів [15].

Дослідження проводили у триразовій повторності. Отримані експериментальні дані обробляли з використанням методів варіаційної статистики з визначенням середніх значень показників.

**Виклад основного матеріалу.** Встановлено, що рисове борошно характеризується нейтральним смаком і високою засвоюваністю, проте має низьку здатність до утримання газів, що обмежує формування пористої структури тіста [16]. Гречане борошно містить значну кількість білка та харчових волокон, підвищуючи біологічну цінність виробів, однак надмірне його використання може погіршувати органолептичні властивості через специфічний смак і колір м'якушки [17]. Кукурудзяне борошно забезпечує привабливий колір та аромат, але підвищує крихкість виробів, що потребує застосування стабілізаторів структури [18].

З метою сприяння покращенню газоутримувальної здатності тіста та формуванню еластич-



ної м'якушки безглютенової булочки вводили псиліум (лушпиння насіння подорожника), який здатний утримувати значну кількість води, утворюючи гелеподібну структуру. Псиліум також активно досліджують як функціональну добавку, яка підвищує еластичність тіста за рахунок утворення гелеподібних структур і водоутримування. В одному з експериментальних досліджень встановлено, що підвищення вмісту псиліуму в рецептурі призводить до змін у реологічних властивостях тіста та фізико-механічних параметрів готових хлібобулочних виробів – підвищується еластичність тіста, але за надмірного вмісту можливе ущільнення м'якушки та підвищення жорсткості скоринки [19-20].

Аналіз хімічного складу сировини показав (табл. 1), що гречане борошно забезпечує високу харчову цінність завдяки підвищеному вмісту білка та клітковини, тоді як рисове та кукурудзяне борошно формують основу вуглеводного комплексу виробів. Високий вміст клітковини у псиліумі сприяє покращенню водоутримувальної здатності тіста та формуванню стабільної пористої структури м'якушки. Енергетична цінність сировини

вини визначає калорійність готового виробу та дозволяє оцінити його дієтичні властивості.

Вивчення технологічних властивостей сировини показало, що поєднання рисового, гречаного та кукурудзяного борошна у оптимальних співвідношеннях дозволить отримати однорідну тістову систему з достатньою в'язкістю та газоутримувальною здатністю. Це створює передумови для формування м'якушки безглютенової булочки із задовільними органолептичними та структурно-механічними характеристиками.

З метою підвищення харчової та біологічної цінності безглютенових булочок для гамбургерів до складу рецептури було введено насіння льону (5 %), насіння кунжуту (5 %), шрот насіння гарбуза (5 %) та в'ялені томати (5 %) як джерела цінних поживних і біологічно активних речовин. (табл. 2)

Дані, наведені в таблиці 2, свідчать, що використані функціональні інгредієнти є джерелами повноцінних білків, харчових волокон, мінеральних речовин та біологічно активних сполук, що дозволяє суттєво підвищити харчову та біологічну цінність безглютенових булочок для гамбургерів.

Таблиця 1

**Хімічний склад альтернативної сировини безглютенової булочки для гамбургерів**

| Найменування сировини | Білки, % | Жири, % | Вуглеводи, % | Клітковина, % | Зола, % | Енергетична цінність, ккал/100 г |
|-----------------------|----------|---------|--------------|---------------|---------|----------------------------------|
| Рисове борошно        | 7,0      | 1,0     | 78,0         | 2,0           | 0,5     | 352                              |
| Гречане борошно       | 13,0     | 3,5     | 70,0         | 4,5           | 2,0     | 343                              |
| Кукурудзяне борошно   | 9,0      | 4,5     | 75,0         | 3,0           | 1,0     | 365                              |
| Псиліум               | 2,0      | 0,5     | 10,0         | 75,0          | 2,0     | 180                              |

Примітка: сформовані значення наведені для сухої речовини на основі нормативних документів і виробничих характеристик ТМ «Хіт продукт», «Органік Еко Продукт», ТОВ «Ландгрейн», ТМ Golden Farm

Таблиця 2

**Харчова та біологічна цінність функціональних інгредієнтів, використаних у рецептурі безглютенових булочок для гамбургерів**

| Найменування показника                | Насіння льону                           | Насіння кунжуту                         | Шрот насіння гарбуза                        | В'ялені томати                       |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| Білки, %                              | 18–22                                   | 18–20                                   | 35–45                                       | 10–14                                |
| Жири, %                               | 40–45                                   | 48–52                                   | 8–12                                        | 2–3                                  |
| Вуглеводи, %                          | 28–30                                   | 20–23                                   | 15–20                                       | 55–60                                |
| Харчові волокна, %                    | 25–28                                   | 10–12                                   | 20–25                                       | 10–15                                |
| Основні біологічно активні компоненти | Омега-3 (α-ліноленова кислота), лігнани | Сезамін, сезамол                        | Фітостероли, токофероли                     | Лікопін, поліфеноли                  |
| Мінеральні елементи                   | Mg, K, Fe                               | Ca, Mg, P                               | Zn, Fe, Mg                                  | K, Fe                                |
| Функціональна дія у виробі            | Поліпшення структури, зниження ГІ       | Збагачення мінералами, покращення смаку | Підвищення білкової та біологічної цінності | Формування смаку, антиоксидантна дія |

Примітка: Дані наведені в перерахунку на суху речовину та узагальнені за джерелами [16, 21-23].

**Рецептура зразків безглютенової булочки для гамбургерів з різними пропорціями альтернативних видів борошна та псиліуму**

| Найменування сировини  | Дослідний зразок 1 | Дослідний зразок 2 | Дослідний зразок 3 |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Борошно рисове, %      | 60                 | 50                 | 30                 |
| Борошно гречане, %     | 20                 | 30                 | 30                 |
| Борошно кукурудзяне, % | 20                 | 20                 | 40                 |
| Псиліум, %             | 3,0                | 5,0                | 10,0               |

Отже, використання комплексу функціональних рослинних інгредієнтів у рецептурі безглютенових булочок для гамбургерів є технологічно доцільним і науково обґрунтованим, оскільки сприяє підвищенню харчової та біологічної цінності виробів, покращенню їх структурно-механічних та органолептичних показників, а також формуванню продукту з підвищеною споживчою привабливістю.

У ході дослідження проведено пробні лабораторні випікання контрольних та дослідних зразків безглютенових булочок для гамбургерів (табл. 3).

До складу дослідного зразку вводили псиліум у кількості, що забезпечувала формування стабільної структури тіста. Замішування тіста здійснювали до отримання однорідної в'язкої маси. Формування булочок проводили вручну, після чого тістові заготовки випікали за температури 180 °C протягом 35 хвилин, далі при температурі 220 °C 10 хв.

Поєднання в межах однієї технології різних видів безглютенової сировини зумовлює формування складних тістових систем, функціональні властивості яких безпосередньо визначаються технологічними характеристиками окремих компонентів. У ході пробних замісів тіста та випікання готових булочок встановлено, що співвідношення рисового, гречаного та кукурудзяного борошна істотно впливає на консистенцію тіста, його формувальні властивості та поведінку під час теплової обробки.

Зокрема, тісто з підвищеним вмістом рисового борошна (Дослід 1) характеризувалося більшою в'язкістю та однорідністю, що полегшувало процес формування заготовок. Водночас збільшення частки гречаного борошна (Дослід 2) сприяло підвищенню поживної цінності виробів, однак потребувало корекції вологовмісту через зростання водопоглинальної здатності тіста. Кукурудзяне борошно забезпечувало формування більш щільної структури м'якушки та впливало на колір готових булочок, надаючи їм характерного жовтуватого відтінку, проте вироби із більшим його вмістом мали підвищену крихкість (Дослід 3).

Використання гідроколіду псиліум у складі рецептури дозволило стабілізувати структуру безглютенового тіста, покращити його газоутримувальну здатність та забезпечити формування еластичної м'якушки, що є критично важливим для булочок для гамбургерів. Псиліум сприяв утворенню гелеподібної матриці, яка частково компенсувала відсутність глютену та забезпечувала збереження форми виробів після випікання та під час розрізання (табл. 4).

Як видно з даних таблиці 4, найкращі структурно-механічні та органолептичні показники були характерні для дослідного зразка 2, що зумовлено збалансованим співвідношенням альтернативних видів борошна та оптимальним вмістом псиліуму.

Органолептична оцінка готових виробів показала, що всі дослідні зразки відповідали вимогам до зовнішнього вигляду та санітарно-гігієнічної безпеки хлібобулочних виробів, проте відрізнялися за формою, структурою м'якушки та текстурою залежно від співвідношення альтернативних видів борошна і вмісту псиліуму. Дослідний зразок 1 мав недостатньо зв'язану, крихку структуру з нерівномірною пористістю, тоді як у зразку 3 спостерігалася надмірна в'язкість тіста та щільна, малопориста м'якушка, що негативно впливало на споживчі властивості виробів.

Найбільш збалансовані органолептичні показники продемонстрував дослідний зразок 2, який характеризувався рівномірною пористістю, еластичною структурою м'якушки, достатньою формостійкістю та приємними смако-ароматичними властивостями. Оптимальне поєднання рисового, гречаного і кукурудзяного борошна у поєднанні з 5,0 % псиліуму забезпечувало стабілізацію тістової системи, цілісність структури під час нарізання та відповідність функціональному призначенню булочок для гамбургерів. Саме цей зразок було обрано як базовий для подальших досліджень показників якості та харчової цінності безглютенових булочок для гамбургерів. Розроблено технологічну схему безглютенових булочок для гамбургерів (рис. 1).

Вплив рецептурного складу на властивості тіста та якість безглютенових булочок для гамбургерів

| Найменування показника                                  | Дослідний зразок 1                          | Дослідний зразок 2                          | Дослідний зразок 3                          |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Співвідношення альтернативних видів борошна             | Рисове 60 %, гречане 20 %, кукурудзяне 20 % | Рисове 50 %, гречане 30 %, кукурудзяне 20 % | Рисове 30 %, гречане 30 %, кукурудзяне 40 % |
| Вміст псиліуму, %                                       | 3,0                                         | 5,0                                         | 10,0                                        |
| Консистенція тіста                                      | М'яка, недостатньо зв'язана                 | Однорідна, пластична                        | Надмірно в'язка, щільна                     |
| Формувальні властивості                                 | Задовільні                                  | Добрі                                       | Ускладнені                                  |
| Структура м'якушки після випікання                      | Крихка, нерівномірна                        | Рівномірна, еластична                       | Щільна, малопориста                         |
| Пористість виробів                                      | Недостатня                                  | Оптимальна                                  | Знижена                                     |
| Формостійкість булочки                                  | Середня                                     | Висока                                      | Висока                                      |
| Органолептична оцінка текстури                          | Задовільна                                  | Добра                                       | Задовільна                                  |
| Придатність для використання як булочки для гамбургерів | Обмежена                                    | Висока                                      | Обмежена                                    |

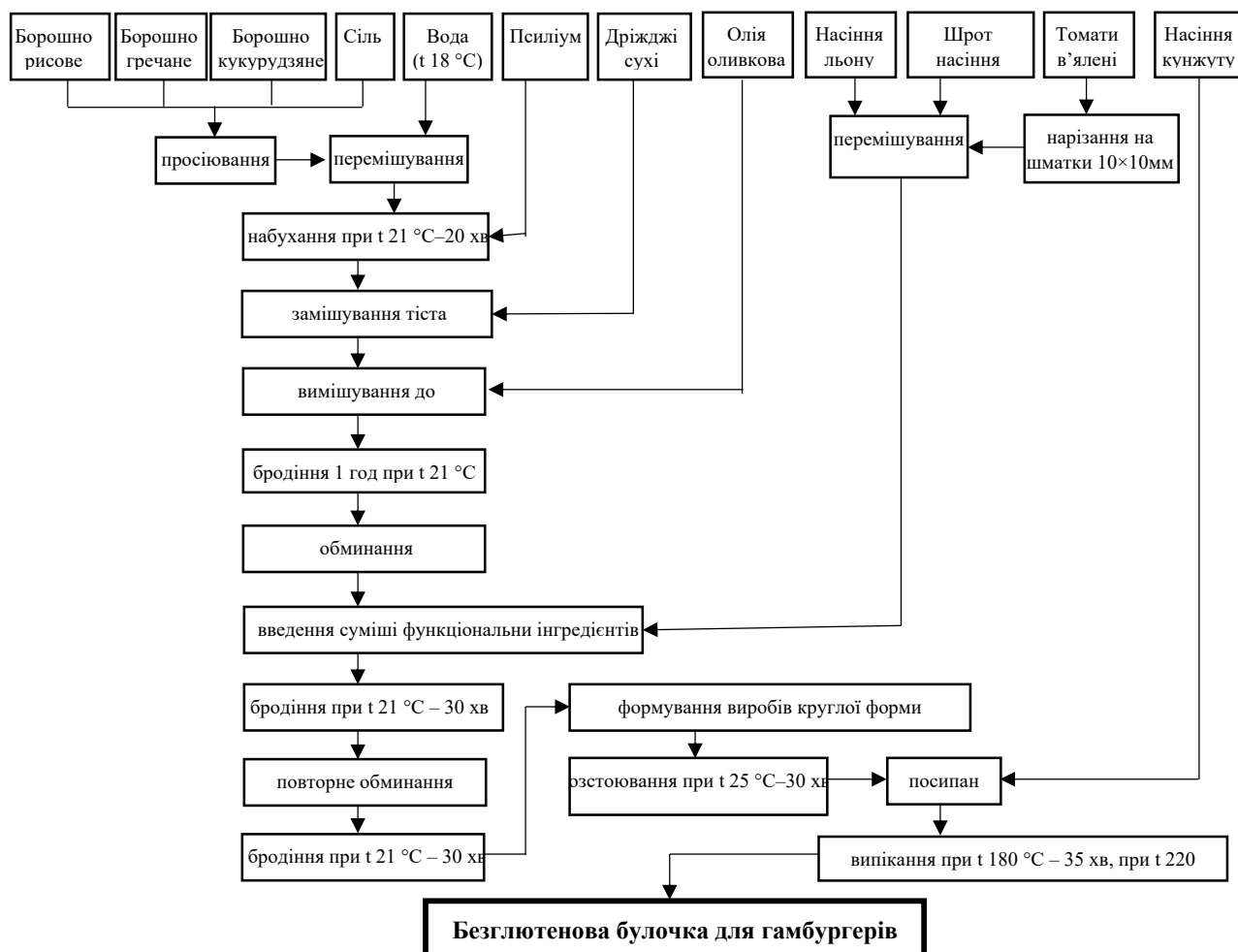


Рис. 1. Технологічна схема виробництва безглютенових булочок для гамбургерів

**Порівняльна характеристика харчової та біологічної цінності  
булочок для гамбургерів (контроль/дослід)**

| Показник                         | Булочка для гамбургерів<br>(контроль) | Безглютенова<br>булочка для<br>гамбургерів (дослід) | Різниця, % |
|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------|
| Енергетична цінність, ккал/100 г | 235                                   | 285                                                 | +10        |
| Білки, г/100 г                   | 6,5                                   | 9,5                                                 | +35        |
| Жири, г/100 г                    | 6,0                                   | 11,0                                                | +60        |
| у т.ч. ненасичені ЖК, г/100 г    | 2,0                                   | 6,5                                                 | у 3,0 р    |
| Вуглеводи, г/100 г               | 34,0                                  | 28,0                                                | -15        |
| Харчові волокна, г/100 г         | 2,5                                   | 8,0                                                 | у 2,5 р    |
| Омега-3 жирні кислоти, г/100 г   | 0,02                                  | 1,2                                                 | –          |
| Кальцій (Ca), г/100 г            | 35                                    | 120                                                 | у 3,0 р    |
| Магній (Mg), г/100 г             | 25                                    | 85                                                  | у 3,0 р    |
| Фосфор (P), г/100 г              | 90                                    | 180                                                 | +80        |
| Залізо (Fe), г/100 г             | 1,0                                   | 2,5                                                 | у 2,0 р    |
| Біологічно активні сполуки       | відсутні                              | лігнани, фітостероли,<br>поліфеноли                 | +          |
| Глікемічне навантаження          | середнє                               | знижене                                             | ↓          |

*Примітка: Дані наведені в розрахунку на 100 г готового виробу та мають розрахунковий характер.*

Проведена порівняльна характеристика харчової та біологічної цінності булочок для гамбургерів (табл. 5)

Як видно з даних таблиці 4, введення до рецептури насіння льону, насіння кунжуту, шроту насіння гарбуза та в'ялених томатів забезпечило істотне підвищення вмісту білків, харчових волокон, ненасичених жирних кислот і мінеральних речовин порівняно з контрольним зразком. Особливо суттєвим є зростання вмісту клітковини та кальцію, що дозволяє віднести розроблену безглютенову булочку для гамбургерів до продуктів з підвищеною харчовою та біологічною цінністю і функціональною спрямованістю.

**Висновки.** На підставі аналізу сучасних наукових досліджень встановлено актуальність розробки безглютенових хлібобулочних виробів функціонального призначення, зокрема булочок для гамбургерів, з використанням альтернативних видів борошна та рослинних функціональних інгредієнтів. Обґрунтовано доцільність використання рисового, гречаного та кукурудзяного борошна у технології безглютенових булочок, що дозволяє сформувати стабільну тістову систему за відсутності глютену та забезпечити задовільні структурно-механічні показники готових виробів.

Установлено, що введення до рецептури гідроколоїду псиліуму в кількості 5,0 % є оптимальним для формування еластичної структури м'якушки, рівномірної пористості та достатньої формостійкості булочок для гамбургерів.

Доведено, що застосування насіння льону, насіння кунжуту, шроту насіння гарбуза та в'ялених томатів сприяє суттєвому підвищенню харчової та біологічної цінності виробів за рахунок зростання вмісту білків, харчових волокон, ненасичених жирних кислот, мінеральних речовин і біологічно активних сполук.

За результатами органолептичної оцінки та дослідження фізико-хімічних і структурно-механічних показників якості встановлено, що найкращі споживчі властивості мав дослідний зразок з рівним співвідношенням альтернативних видів борошна та вмістом псиліуму 5,0 %, що відповідає функціональному призначенню булочок для гамбургерів.

Розроблена рецептура безглютенової булочки для гамбургерів може бути рекомендована для впровадження у закладах ресторанного господарства та підприємствах харчової промисловості як продукт спеціального та функціонального харчування.

#### Список літератури:

1. Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва : підручник. – Київ : Логос, 2002. 365 с.
2. Сенаторова Г. С., Омельченко О. В., Тесленко Т. О., Муратов Г. Р., Орлова Н. М., Чатикян К. О. Проблеми диференційної діагностики целиакиї та непереносимості глютену у дітей. *Неонатологія, хірургія та перинатальна медицина*. 2023. Т. 13, № 2(48). С. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.24061/2413-4260.XIII.2.48.2023.9>

3. Houben A., Höchstätter A., Becker T. Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production. *European Food Research and Technology*. 2012. Vol. 235. P. 195–208.
4. Грищенко А. М., Дробот В. І. Технологічні властивості безглютенових видів сировини. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2014. Т. 1, № 46. С. 162–166.
5. Anna-Sophie Hager, Anika Wolter, Fritz Jacob, Emanuele Zannini, Elke K. Arendt Nutritional properties and ultra-structure of commercial gluten free flours from different botanical sources compared to wheat flours. *Journal of Cereal Science*. 2012. Vol. 56, Issue 2. P. 239–247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.06.005>
6. Arendt E. K., Dal Bello F. *Gluten-Free Cereal Products and Beverages*. – London: Academic Press, 2008. 483 p.
7. Jordanna S. Monteiro, Priscila Farage, Renata Puppim Zandonadi et al. A Systematic Review on Gluten-Free Bread Formulations Using Specific Volume as a Quality Indicator. *Foods*. 2021. Vol. 10(3). P. 614. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10030614>
8. Слащева А., Федорова Д., Ланська, В. Problems and prospects of the production of gluten-free bakery products in Ukraine. *SWorldJournal*. 1(15-01), 8–13. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2022-15-01-018>
9. N. Utarova, M. Kakimov, B. Gajdzik, R. Wolniak et al. Development of Gluten-Free Bread Production Technology with Enhanced Nutritional Value in the Context of Kazakhstan. *Foods*. 2024. Vol. 13(2). P. 271. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13020271>
10. Медведєва А. Технологія безглютенових булочних виробів. Товари і ринки. Сер. Техн. науки. 2018. № 4. С. 115–123.
11. Магазин продуктів без глютену GlutenOff. URL: <https://glutenoff.ua/uk/> (дата звернення: 05.01.2026 р.).
12. ДСТУ 4585:2006. Вироби хлібобулочні здобні. Загальні технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2006.
13. ДСТУ 7044:2009. Вироби хлібобулочні. Правила приймання, методи відбирання проб, методи визначання органолептичних показників і маси виробів. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 9 с.
14. ДСТУ 7045:2009. Вироби хлібобулочні. Методи визначення фізико-хімічних показників. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 33 с.
15. Лабораторний практикум з технології хлібопекарського і макаронного виробництва / за ред. В. І. Дробот. Київ : Центр навчальної літератури, 2006. 341 с.
16. Галушко М., Стеценко Н. Характеристика рисового борошна, кеш'ю та шроту насіння гарбуза як сировини для виробництва безглютенового печива. *Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.*, 16 листопада 2022 р., м. Київ. Київ : НУХТ, 2022. С. 44–46.
17. Lin L. Y. et al. Effect of buckwheat flour on gluten-free bread quality. *Food Science and Technology*. 2013. Vol. 50. P. 59–65.
18. Юдіна Т. І., Безрученко О. М. Технологічні властивості борошна круп'яних культур для виробництва безглютенових кексів. *Продовольчі ресурси*. 2022. Т. 10. №. 19. С. 176–183. DOI: <https://doi.org/10.31073/foodresources2022-19-20>
19. Camilly Fratell, Fernanda Garcia Santos, Denise Garcia Muniz et al. Psyllium Improves the Quality and Shelf Life of Gluten-Free Bread. *Foods*. 2021, 10(5), 954. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10050954>
20. Camilly Fratelli, Denise G. Muniz, Fernanda G. Santos, Vanessa D. Capriles Modelling the effects of psyllium and water in gluten-free bread: An approach to improve the bread quality and glycemic response. *Journal of Functional Foods*. Volume 42, March 2018, Pages 339-345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.01.015>
21. Слободянюк Н. М., Сухенко Ю. Г., Веретинська І. А. Харчова та біологічна цінність насіння льону. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2014. Вип. 46(1). С. 91–94.
22. Кононенко Л. М., Євчук Я. В., Войтовська В.І., Третьякова С. О. Вміст біохімічної складової в насінні кунжута залежно від його забарвлення. *Збірник наукових праць уманського національного університету*. 2020. 97 (1). С. 229–239. DOI <https://doi.org/10.31395/2415-8240-2020-97-1-229-239>
23. В'ялені томати в олії. URL: <https://surl.la/oiclwpr> (дата звернення: 12.01.2026 р.).

#### **Danyiuk I.P., Strutyńska L.T. PRODUCTION TECHNOLOGY AND QUALITY INDICATORS OF FUNCTIONAL GLUTEN-FREE HAMBURGERS BUNS BASED ON ALTERNATIVE RAW MATERIALS**

*The article highlights the production technology and investigates the quality indicators of functional gluten-free hamburger buns developed on the basis of alternative types of flour. The relevance of the study is due to the increasing prevalence of celiac disease and gluten intolerance, which determines the need for specialized food products, as well as the increased interest of consumers in functional and safe food products.*

*The aim of the study was to develop a recipe for gluten-free hamburger buns using alternative types of flour; ensure the stability of the dough structure and determine the influence of functional components on the quality and nutritional value of the products. Rice, buckwheat and corn flour were selected as the main components of the recipe, which differ in chemical composition and technological properties, which allows adjusting the porosity and elasticity of the crumb. Psyllium was used to improve the gas-holding capacity of the dough and form a stable elastic structure.*

*In addition, flax seeds, sesame seeds, pumpkin seed meal and sun-dried tomatoes were added to the recipe to increase the nutritional and biological value of the products, in particular the content of protein, dietary fiber, minerals and antioxidants. A series of laboratory studies was conducted, including trial batches and baking of samples with different ratios of alternative types of flour and psyllium. The buns were evaluated for organoleptic, physicochemical and structural-mechanical indicators, as well as for nutritional and biological value.*

*The results of the studies showed that the optimal combination of rice (50%), buckwheat (30%) and corn flour (20%) in combination with 5% psyllium provides uniform porosity, elastic crumb structure, sufficient dimensional stability and pleasant taste and aromatic properties of the products, which correspond to the functional purpose of hamburger buns. The use of functional ingredients allows to increase the biological value of the product, increase the content of protein and dietary fiber, as well as improve digestibility and microbiological stability.*

*The obtained results confirm the feasibility of using alternative types of flour and structure-forming components in the technology of gluten-free hamburger buns. The practical significance of the study lies in the possibility of implementing the developed recipes in the production of specialized food products for consumers with gluten intolerance.*

**Keywords:** *gluten-free buns, alternative types of flour, psyllium, nutritional value, functional ingredients.*

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Kovach O.I.**

<https://orcid.org/0009-0005-2099-0827>

Odesa National University of Technology

## WORLD PRODUCTION OF PETILLANT NATUREL SPARKLING WINES, TECHNOLOGIES AND TRENDS

*Pét-Nat (Petillant Naturel) is the oldest type of sparkling wine from France, which is produced by the Ancestral method, and precedes the appearance of champagne. Currently, these wines are becoming the most popular trend in the winemaking industry, attracting attention for their naturalness, authenticity and lack of complex technological processes. Purpose: to analyze the state and prospects of the world production of sparkling wines of the Pét-Nat type, to characterize innovations in the technology of their production. The methodological basis was a meta-analysis, which involved searching for scientific articles on the relevant topic, a comparative and descriptive analysis of world production and a generalization of the results of various studies on technologies and trends in the production of sparkling wines of the Pét-Nat type. The EU remains the main producer of Pét-Nat, accounting for 70-80% of world production, with Italy and France leading the way, so since 2020, imports of Pét-Nat to the EU have been decreasing and remained at a stable low level until 2024. The disadvantages of the Ancestrale method are the difficulty of controlling the fermentation process and ensuring full stability and reliability, and the «capriciousness» of the technology. The advantages include that it is relatively inexpensive, simple, flexible, as it can be used in home winemaking and industrial conditions, but at the same time it has many risks and is difficult to control. This confirms the relevance of developing a methodology for producing Pét-Nat wines and finding ways to improve control of the technological process. The decisive factors for ensuring the stability of the production process and obtaining high-quality and authentic Pét-Nat wine are the chemical composition of the must, fermentation management and a clear bottling protocol. Grape varieties such as Riesling, Albarino and Pinot Noir, and among the hybrid varieties – Catawba, Diamond and Marquette are traditionally used in the Pét-Nat wine technology. The key differences between Pét-Nat wine and traditional sparkling wines that determine the quality of these wines are higher acidity, low carbon dioxide content, a wide palette of taste and aromatic characteristics towards the predominance of fruit, tropical and floral aromas, the content of residual sugar, which is influenced by specific features of the production process (for example, the absence of secondary fermentation under pressure, aging on the lees, the absence of disgorging). Pét-Nat has the potential to meet the needs of consumers who value naturalness, minimal intervention in the technological process and authentic taste, which creates significant opportunities for the further development of this category of wines in Ukraine and the world.*

**Keywords:** sparkling wine, winemaking, petillant naturel, wine technology, production, winemaking trends.

**Formulation of the problem.** Sparkling wine of the type Pét-Nat (Petillant Naturel), from the French «*naturally sparkling*» has become one of the most popular trends in the modern world of winemaking. This type of wine attracts attention with its naturalness and natural taste, the absence of complex technological processes, authenticity and the absence of food additives in the recipe.

Pét-Nat is considered the oldest form of sparkling wine production in France, which precedes the appearance of champagne. One of the hypotheses of the emergence of Pét-Nat wines suggests that wines in the naturally cool regions of France underwent pri-

mary fermentation before the onset of winter, when the decrease in temperature naturally stopped the process. Not knowing that fermentation was incomplete, winemakers bottled the young wine, and with the return of warmer temperatures in the spring, fermentation resumed inside the bottle [1].

The technology of this wine is based on the Ancestral Method (la méthode ancestrale), which includes one primary fermentation that begins in the tank and ends in the bottle. The result is a wine with sediment, which retains natural carbon dioxide and has a different content of residual sugar. The disadvantages of the traditional Ancestrale method are the difficulty of





controlling the fermentation process and ensuring full stability and reliability of the process, "capriciousness", instability of the parameters of the process of obtaining and the quality of the finished product [2].

But sparkling wines produced by the Ancestrale method, despite a significant number of risks, are now gaining an increasing percentage of the sparkling wine market, where there is a reformatting of the assortment towards preserving the natural properties of the raw materials and increasing demand for Pét-Nat. Therefore, a detailed study of the production process of these wines is a relevant issue of our time.

#### **Analysis of recent research and publications.**

Since 2021, there has been a noticeable increase in the production of Pét-Nat worldwide. This development is mainly due to small and medium-sized wineries adapting traditional French techniques to local conditions. The demand for this type of sparkling wine is growing rapidly among consumers, especially during the summer season. The contributing factors to its popularity are naturalness, minimal process intervention and light, refreshing organoleptic characteristics that distinguish Pét-Nat from traditional sparkling wines. The EU remains the main producer of Pét-Nat, accounting for 70–80% of global production, with Italy and France leading the way, so since 2020, imports of Pét-Nat into the EU have been decreasing and are of a consistently low value until 2024 [3, 4].

Among the new producing developing countries, it is worth noting the United Kingdom, Portugal, Brazil and Australia. In 2023, EU production decreased by approximately 8%, with Italy, France and Germany remaining the main producers. But in the export situation, we can see that, starting from 2021, there was an increase of almost twofold and remains at the same level until 2024, despite the decrease in production volumes [4].

The method of production of sparkling wines Pet-Nat Ancestrale has several important stages:

1. Selection of raw materials – the fruits are harvested at the most optimal moment of maturity. This is important to obtain a balance between acidity and sweetness.

2. Primary fermentation – the grape must is fermented naturally in tanks until a sufficient amount of natural sugar remains in the wine.

3. Bottling – unlike the traditional method of production of sparkling wines, where yeast and sugar are added before the second fermentation, in the case of Pet-Nat this is performed at the beginning of the process. The drink is bottled before the primary fermentation is complete, so it simply continues directly in the bottle. Since the wine still contains residual sugar,

the fermentation process proceeds naturally without adding of tirage liqueur, until the yeast cells have processed all the sugar.

4. Corking – the bottles are corked, and the fermentation process continues, forming carbon dioxide. It should be noted that sparkling wines of the Pet-Nat type often have a natural sediment, which is the result of the vital activity of residual yeast and is an indicator of their naturalness. Usually, the wine is not disgorged, so there is a sediment of spent yeast at the bottom of the bottles. Nevertheless, some winemakers disgorge their Pet-Nat to make it look more understandable and attractive to consumers and to reduce an excess pressure when it is needed.

5. Aging – sparkling wines of the Pet-Nat type do not require long aging. They are usually ready for consumption within a few months after bottling.

The advantages of this method are that it is relatively inexpensive, simple, and flexible, as it can be used in home winemaking and industrial settings, but it has many risks and is difficult to control.

Despite the simplicity of Pét-Nat production using the Ancestrale method and the lack of significant material resources, producers in practice face many problems, including the lack of scientifically sound data on the correct choice of raw materials, the influence of individual factors on the technological process and wine quality. In addition, there is little information on general theoretical approaches to organizing the production of Pét-Nat wines using the Ancestrale method. Generalizing existing data on the criteria for assessing the suitability of raw materials for use in Pét-Nat wine technology will help producers improve the quality of Pét-Nat wine, effectively organize the production process and expand the range. The described factors confirm the relevance of research in this direction.

**Task statement.** *The purpose of the research is to analyze the state and prospects of the world production of sparkling wines of the Pét-Nat type, to characterize innovations in the technology of their production.*

#### *Research objectives:*

- to conduct an information search for current information on the world production of sparkling wines of the Pét-Nat type;

- to conduct an analytical review of scientific and technical information on innovations in production technology and trends in the development of the market of sparkling wines of the Pét-Nat type.

Analytical methods were used in the research, as well as methods of cause-and-effect analysis and logical generalization. The methodological basis of the

research was chosen as a meta-analysis, which provided for the search for scientific articles on the relevant topic, a comparative-descriptive analysis of the world production of sparkling wines of the Petillant Naturel type and a generalization of the results of various studies on technologies and trends in the production of sparkling wines of the Petillant Naturel type.

At the first stage of the study, a search for relevant scientific literature was conducted, focusing on articles published in the period 2012-2025 and indexed by the international scientometric databases Scopus, WoS, based on the following code:

- TITLE-ABS-KEY («sparkling wines» AND «Petillant Naturel» AND «production of sparkling wines Petillant Naturel» AND «Ancestrale»);
- AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, «English»)).

Information from databases, including PubMed, CrossRef, etc., was also analyzed.

The search resulted in 70 publications, after analyzing each article and clarifying the direction of the research and the availability of the necessary results, the sample for meta-analysis was limited to 21 original articles. The frequency of displaying articles on the research topic, according to the search code and the results of the extended analysis, in individual journals ranged from 3 to 1 unit. The number of journals, each of which published more than 3 articles for the study period 2012–2025, was 2 journals.

**Outline of the main material of the study.** The term «Pét-Nat» is usually used to describe a sparkling wine with a lower carbon dioxide level than traditional champagne.

A new direction in the development of Pet-Nat carbonated beverage technologies is sparkling ciders. Quality assessment of natural sparkling Pet-Nat ciders made in the traditional Ancestrale method from different varieties of Croatian apples showed that the pH value, color, aromatic and sensory profile of the final product varied significantly depending on the variety, confirming the importance of choosing the right variety of raw materials [2, 5].

The traditional grape variety used to make Pét-Nat in France is Mauzac (Blanquette), which is characterized by a characteristic taste of dried apple peel. The domestic and global alcoholic beverage market is experiencing an increase in the popularity of sparkling wines of the Pét-Nat type, the technology of which uses fruit and berry raw materials, in particular cherries, apples, etc.

Ukrainian Pét-Nat producers mostly focus on creating white wines from local grape varieties such as Tsytronnyi Maharacha, Sukholimanskiy white and

Telti-Kuruk, and also use European varieties such as Muscat Ottonel. Pinot Noir and Merlot are most often used for the production of rosé Pét-Nat wines, which provide a wide range of aromas and flavors in the final product [6, p. 2370-2371].

Studies of the technological features of the production of sparkling wines of the Pétillant Naturel type, made using the Ancestrale method from Muscat Ottonel and Pinot Noir grapes, have shown that Pét-Nat wines are characterized by lower acidity, higher levels of residual sugar, more pronounced fruity and floral aromas, greater richness and the presence of creamy notes due to prolonged contact with the lees. In contrast, sparkling wines made using the tank method are characterized by higher acidity, lower carbon dioxide content and a less pronounced flavor profile. The results highlight significant sensory differences between experimental samples, driven by both technological factors and grape varietal characteristics, and confirm the great potential of Pét-Nat production in meeting the demand of consumers seeking natural and authentic wines [7, p.295-298].

Other studies have shown that sparkling wines produced by the Ancestrale method were more heterogeneous than sparkling wines produced by the tank method, as some of them showed higher internal pressure, turbidity, color intensity and gas content. These differences are probably due to the fact that the Ancestrale sparkling wine production protocol does not have a clearly developed methodology, as for traditional sparkling wines produced by the tank method.

Scientists note the sensory profile of sparkling wines produced by the Ancestral method and are characterized by an enhanced floral and citrus aroma, an intense yellow color, creaminess, and fullness of taste due to a wider spectrum of volatile ester compounds. It was concluded that the efficiency of this method is higher, since it is possible to produce a product faster with fewer stages, compared to the Charm method and artificial gasification [8, p. 324-327].

The search for the optimal yeast strain for obtaining high-quality sparkling wines without yeast notes showed that wines made with the Odessa Black-SD13 yeast strain received the highest tasting scores. They contained a higher amount of phenolic substances (1103 mg/dm<sup>3</sup>), dyes (275 mg/dm<sup>3</sup>) and a higher color intensity (1.614). This yeast strain provided intensive fermentation of sugars and a large amount of bound CO<sub>2</sub> (up to 24.93%) [9, p. 2080-2085].

Thus, the determining factors for ensuring the stability of the production process and obtaining high-quality and authentic Pét-Nat wine are the

chemical composition of the must, fermentation management and a clear bottling protocol.

Grape varieties such as Riesling, Albarino and Pinot Noir, and among the hybrid varieties – Catawba, Diamond and Marquette are excellent for the production of Pét-Nat. The main requirements for the raw material are bright acidity and a lower amount of phenols. But greater requirements are placed on the quality of the must from which the wine will be made [10].

In general, the characteristics of the must that ensure high wine quality are: high acidity, low tannin content and sufficient YAN (yeast-assimilable nitrogen). It is known that CO<sub>2</sub> content and acidity have a synergistic relationship: carbonation slightly acidifies the wine, and acid helps to harmoniously integrate carbonation, which is why usually high acid grapes are often more privileged. A titrated acidity value of 8–12 g/l of tartaric acid is usually the optimal range [11].

Tannins increase the undesirable astringency of the wine, so their amount should be limited. Tannin extraction can be minimized by limiting the contact time between crushing and pressing. If the juice is excessively astringent, excess tannins can be removed by clarifying the protein with egg white, skimmed milk or gelatin.

YAN is the chemical parameter that most influences the state of fermentation. If the YAN is low, fermentation is inhibited and automatically spoils the quality of the wine. If the YAN is high, fermentation can proceed too quickly, with the residual sugar being a source of nutrition for wild yeasts that cause wine spoilage. The optimal value of YAN depends on the yeast strain and fermentation conditions, but traditionally, within 100–200 ppm, fermentation is fully ensured.

It can be stated that, at the rate of 0.5 to 0.6% vol per °Brix to be fermented, the ideal initial sugar level for Pét-Nat is 15–25°Brix. [12, 13].

The pressure indicator can be used to regulate the fermentation process. When the internal pressure in the bottle approaches 6 atm, the vital activity of the yeast is inhibited and fermentation stops, leaving any remaining sugar unfermented, which can be used to stabilize the taste properties of the wine with higher acidity.

It is definitely necessary to ensure the authenticity of Pét-Nat wine at the expense of the natural microflora of the raw material, without the introduction of commercial yeast strains. But there is no doubt that the use of commercial yeast is one of the ways to ensure the stability of the process and the quality characteristics of the wine. Having studied the characteristics of yeast strains in advance, it is possible to adjust and

predict the course of the technological process. In the production of sparkling wines, the classic strains are Lalvin EC-1118, Prise de Mousse. EC-1118 meets all the requirements for yeast strains for this technology: high resistance and low nitrogen demand, stable fermentation speed, compact sedimentation and cold resistance [14–16].

It is necessary to carefully control the speed and temperature of fermentation. If fermentation occurs too quickly, it can be slowed down by cooling the medium to 10–13°C (50–55°F).

The correct timing of bottling, the use of spray additives and the use of quality bottling containers play a significant role in shaping the organoleptic and visual profiles of Pét-Nat wines, as they affect the level of carbonation and residual sugar in the finished wine.

An additional benefit of chilling the wine to stop fermentation before bottling is the stabilization of tartrates. If tartrates are not effectively stabilized, they can settle in the bottle, which can lead to gushing – excessive bubble formation.

The addition of a bentonite suspension at a concentration of 100–300 ppm before bottling has a positive effect on the clarity and stability of the finished product, promoting compact settlement of spent yeast [17, 18].

Pét-Nat wines should be bottled in champagne bottles, ensuring tightness. Since the pressure in the wine can reach 6 atm (provided that it was bottled at a strength of 2.4–3°Brix or higher), using an airtight bottle is the most reliable way to prevent excessive fermentation of the wine [19].

After bottling, aging the wine at a temperature of 10–16 °C (50–60 °F) for 1–2 months finally completes the fermentation and the wine is ready for consumption.

Thus, the key differences between Pét-Nat wine and traditional sparkling wines are higher acidity, low carbon dioxide content, predominance of fruity and floral aromas, and residual sugar content, which are influenced by specific features of the production process (e.g., no secondary fermentation under pressure, aging on the lees, no disgorging) [20, 21].

**Conclusions.** The reformatting of the structure of the sparkling wine range towards preserving the natural properties of raw materials, naturalness and the status of «Clean Label» has led to the growth of the popularity of Pét-Nat wines.

An analytical review of scientific and technical literature confirmed that Pét-Nat sparkling wines produced by the Ancestral method lead to the creation of a product with unique sensory characteristics, different from traditional sparkling wines produced by the

Charmat method. And the use of non-traditional raw materials contributes to the expansion of the range of such wines.

Pét-Nat has the potential to meet the needs of consumers who value naturalness, minimal intervention in the technological process and authentic taste, which creates significant opportunities for the further development of this category of wines in Ukraine and the world.

The method of production of Pét-Nat Ancestral is simple, inexpensive, but the «spontaneity» of the pro-

cess and the lack of control of key stages of the technological process cannot guarantee stable wine quality. Therefore, the «unpredictability» of the quality indicators of the finished wine inhibits the industrial development of Pét-Nat wines and limits the application of the technology only to home conditions or small-scale enterprises. This confirms the scientific novelty of the chosen direction of research, namely, the development of a methodology for the production of Pét-Nat wines and the search for ways to improve control of the technological process.

#### Bibliography:

1. Just Borràs, A. Ancestral sparkling wines; Comparison with traditional sparkling wines and procedures to improve their quality. *Universitat Rovira i Virgili*. 2024. P. 274. URL: <http://hdl.handle.net/10803/691833> (accessed on 24 November 2025)
2. Just-Borràs A., Alday-Hernández M., García-Roldán A., Bustamante M., Gombau J., Cabanillas P., Rozès N., Canals J. M., Zamora F. Assessment of physicochemical and sensory characteristics of commercial sparkling wines obtained through ancestral and traditional methods. *Beverages*. 2024. № 10(4). P. 103. <https://doi.org/10.3390/beverages10040103>
3. Kucherenko V., Uspalenko O., Schmitt M. Natural sparkling wine pétillant naturel: technological features and sensory profile. *IVES Conference Series, 46th World Congress of Vine and Wine*. 2025. <https://doi.org/10.58233/XPfta0jt> (accessed on 24 November 2025)
4. Jagatić Korenika A.-M., Preiner D., Tomaz I., Skendrović Babojelić M., Jeromel A. Aroma Profile of Monovarietal Pét-Nat Ciders: The role of croatian traditional apple varieties. *Horticulturae*. 2022. № 8. P. 689. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080689>
5. Asimov E. The natural style reaches into its bubbly past. *New York: New York Times, D4(L)*, 2018. URL: <https://link.gale.com/apps/doc/A530894951/AONE?u=anon~3bbc5ac4&sid=googleScholar&xid=3f5aee4> (accessed on 24 November 2025)
6. Dachery B., Hernandez K.C., Zini C.A., Welke J.E., Manfroi V. Volatile and sensory profile of sparkling wines produced by faster and alternative methods (Ancestral and Single Tank Fermentation) compared to the usual methods (Charmat and Traditional). *European Food Research and Technology*. 2023. № 249. Pp. 2363–2376. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04303-z>
7. Makarov A., Lutkov I. Yeast race effect on the quality of base and young sparkling wines. *Foods and Raw Materials*. 2021. № 9. Pp. 290–301. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-290-301>
8. Cisiloo B., Scariot F.J., Schwarz L.V., Rocha R.K.M., Delamare A.P.L., Echeverrigaray S. Are the characteristics of sparkling wines obtained by the Traditional or Charmat methods quite different from each other? *OENO One*. 2023. № 57. Pp. 321–331 <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.1.7313>
9. Kemp B., Condé B., Jégou S., Howell K., Vasserot Y., Marchal R. Chemical compounds and mechanisms involved in the formation and stabilization of foam in sparkling wines. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. № 59. Pp. 2072–2094. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1437535>
10. Cravero M.C. Innovations in sparkling wine production: A review on the sensory aspects and the consumer's point of view. *Beverages*. 2023. № 9. P. 80. <https://doi.org/10.3390/beverages9030080>
11. Luchian C. E., Grosaru D., Scutarușu E. C., Colibaba L. C., Scutarușu A., Cotea V. V. Advancing sparkling wine in the 21st century: from traditional methods to modern innovations and market trends. *Fermentation*. 2025. № 11(4). P. 1174. <https://doi.org/10.3390/fermentation11040174>
12. Eder M.L.R., Rosa A.L. Non-conventional grape varieties and yeast starters for first and second fermentation in sparkling wine production using the traditional method. *Fermentation*. 2021. № 7. P.321. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040321>
13. Di Gianvito P., Arfelli G., Suzzi G., Tofalo R. New trends in sparkling wine production: Yeast rational selection in alcoholic beverages. In *Alcoholic Beverages/ Grumezescu, A.M., Holban, A.M., Eds. Woodhead publishing: Duxford, UK*, 2019. № 7. Pp. 347–386. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815269-0.00011-8>
14. Cotea V.V., Focsa M.C., Luchian C.E., Colibaba L.C., Scutarușu E.C., Marius N., Zamfir C.I., Popîrdă A. Influence of different commercial yeasts on volatile fraction of sparkling wines. *Foods*. 2021. № 10. P. 247. <https://doi.org/10.3390/foods10020247>
15. Buxaderas S., López-Tamames E. Sparkling wines: Features and trends from tradition. *Adv. Advances in Food and Nutrition Research*. 2012. № 66. Pp. 1–45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394597-6.00001-X>

16. Ubeda C., Callejón R.M., Troncoso A.M., Peña-Neira A., Morales M.L. Volatile profile characterisation of Chilean sparkling wines produced by traditional and Charmat methods via sequential stir bar sorptive extraction. *Food Chemistry*. 2016. № 207. Pp. 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.117>
17. Ferreira-Lima N.E., Burin V.M., Bordignon-Luiz M.T. Characterization of Goethe white wines: Influence of different storage conditions on the wine evolution during bottle aging. *European Food Research and Technology*. 2013. № 237. Pp. 509–520. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-2019-5>
18. Shanshiashvili G., Baviera M., Fracassetti D. Exploring grape pressing for sparkling wine production: A comprehensive literature review on physicochemical parameters and technological applications. *Applied Food Research*. 2024. № 4. P. 100454. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100454>
19. Puig-Pujol A., Bertran E., García-Martínez T., Capdevila F., Mínguez S., Mauricio J.C. Application of a new organic yeast immobilization method for sparkling wine production. *American Journal of Enology and Viticulture*. 2013. № 64. Pp. 386–394. <https://doi.org/10.5344/ajev.2013.13031>
20. Comitini F., Capece A., Ciani M., Romano P. New insights on the use of wine yeasts. *Current Opinion in Food Science*. 2017. № 13. Pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.02.005>
21. Berbegal C., Polo L., García-Esparza M.J., Álvarez I., Zamora F., Ferrer S., Pardo I. Influence of the dry yeast preparation method on final sparkling wine characteristics. *Fermentation*. 2022. № 8. P.313. <https://doi.org/10.3390/fermentation8070313>

### Ковач О.І. СВІТОВЕ ВИРОБНИЦТВО ІГРИСТИХ ВИН ТИПУ ПЕТ-НАТ (PETILLANT NATUREL), ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕНДЕНЦІЇ

*Pét-Nat (Petillant Naturel)* є найдавнішим видом ігристих вин у Франції, який виготовляється методом *Ancestrale* та передуює появі шампанського. Нині ці вина стають найпопулярнішим трендом у галузі виноробства, привертаючи увагу своєю натуральністю, автентичністю та відсутністю складних технологічних процесів. Мета: проаналізувати стан та перспективи світового виробництва ігристих вин типу *Petillant Naturel*, охарактеризувати інновації в технології їх виробництва. Методи. Методологічною основою був мета-аналіз, що передбачав пошук наукових статей за відповідною тематикою, порівняльно-описовий аналіз світового виробництва та узагальнення результатів різних досліджень щодо технологій та тенденцій виробництва ігристих вин типу *Petillant Naturel*. Результати. ЄС залишається основним виробником *Pét-Nat*, на який припадає 70-80% світового виробництва, причому лідерами є Італія та Франція, тому починаючи з 2020 року імпорт *Pét-Nat* до ЄС знижується та має стабільно низьке значення до 2024 р. Недоліками методу *Ancestrale* є складність контролю процесу бродіння та забезпечення повною мірою стабільності та надійності, «примхливість» технології. До переваг належить те, що він відносно незатратний, простий, гнучкий, оскільки його можна використовувати в домашньому виноробстві та промислових умовах, але при цьому він має багато ризиків і його складно контролювати. Це підтверджує актуальність розробки методології виробництва вин *Pét-Nat* та пошук способів покращення контролю технологічного процесу. Визначальними факторами для забезпечення стабільності процесу виготовлення та отримання якісного і автентичного вина *Pét-Nat* є хімічний склад соку, управління ферментацією та чіткий протокол розливу. Сорти винограду, такі як Рислінг, Альбаріньо та Піно Нуар, а серед гібридних сортів – Катавба, Даймонд та Маркетт традиційно використовують в технології вина *Pét-Nat*. Ключові відмінності між вином *Pét-Nat* та традиційними ігристими винами, що визначають якість цих вин є вища кислотність, низький вміст діоксиду вуглецю, широка палітра смако-ароматичних характеристик в бік переважання фруктових, тропічних та квіткових ароматів, вміст залишкового цукру, на які впливають специфічні особливості виробничого процесу (наприклад, відсутність вторинного бродіння під тиском, витримка на осаді, відсутність дегоргажу). *Pét-Nat* має потенціал задовольнити потреби споживачів, які цінують натуральність, мінімальне втручання в технологічний процес та автентичний смак, що створює значні можливості для подальшого розвитку цієї категорії вин в Україні та світі.

**Ключові слова:** ігристе вино, виноробство, *petillant naturel*, технологія виноробства, виробництво, тенденції виноробства.

Дата першого надходження статті до видання: 23.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

## ТРАНСПОРТ

УДК 656.1(477):339.92

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/41>

**Волобуєва Т.В.**

<https://orcid.org/0000-0003-0340-3326>

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Кувшинов А.О.**

<https://orcid.org/0000-0003-1435-6879>

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Мінаков В.М.**

<https://orcid.org/0000-0002-0087-503X>

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Степанов О.В.**

<https://orcid.org/0000-0003-4954-2532>

Національний університет біоресурсів і природокористування України

## КОНЦЕПЦІЯ РОЗВИТКУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ІНТЕГРАЦІЇ

У статті розглянуто концепцію розвитку автомобільного транспорту України в контексті європейської інтеграції. Відповідно до цього метою статті є загальний аналіз розвитку автомобільного транспорту України в контексті європейської інтеграції з урахуванням основних нормативно-правових актів, що визначають стратегічні орієнтири модернізації автотранспортної галузі у сфері українського законодавства до законодавства Європейського Союзу. У ході дослідження узагальнено еволюцію автомобільного транспорту України, визначено основні тенденції модернізації та реформування відповідно до європейських стандартів. Встановлено, що український автомобільний транспорт перебуває у фазі глибоких трансформацій. Водночас відзначено уповільнені темпи законодавчих реформ. Увага приділяється законодавчому врегулюванню ринку автомобільних перевезень, що забезпечує рівні конкурентні умови українських перевізників на ринку ЄС. Зокрема, впровадженню Стратегії безпеки дорожнього руху, яка охоплює інфраструктуру, технічну безпеку, культуру користування дорогами та допомогу постраждалим. Розглянуто ключові законопроекти України щодо гармонізації транспортних послуг із європейськими стандартами. Наголошується на значенні Національної транспортної стратегії до 2030 року, яка спрямована на відновлення та розвиток транспортної системи після російської агресії, інтеграцію у транс'європейську мережу TEN-T, розвиток мультимодальних перевезень, впровадження екологічних стандартів «Євро-5» та забезпечення стійкої, безпечної та конкурентоспроможної транспортної інфраструктури. Зроблено висновок, що попри складні зовнішні фактори, Україна послідовно реалізує євроінтеграційні зобов'язання, що створює основу для подальших реформ і інтеграції в єдиний транспортний простір ЄС.

**Ключові слова:** автомобільний транспорт, розвиток, євроінтеграція, законодавство України, законодавство ЄС, транспортна політика України.

**Постановка проблеми.** Європейська інтеграція є одним із ключових напрямів розвитку України, що передбачає модернізацію економіки та приведення її до норм Європейського Союзу

(ЄС). У цьому процесі важливою є сфера автомобільного транспорту, яка забезпечує основні вантажні й пасажирські перевезення, сприяє розвитку торгівлі та зміцнює зв'язки між регіонами.



Підписання Угоди про асоціацію України з ЄС стало поштовхом до оновлення законодавства, підвищення стандартів безпеки руху, екологічності та ефективності транспортних процесів. Зокрема, це передбачає модернізацію дорожньої мережі, підвищення рівня безпеки дорожнього руху, зниження екологічного навантаження автомобільного транспорту та удосконалення механізмів регулювання перевезень.

Приєднання України до транс'європейської транспортної мережі (Trans-European Transport Network, TEN-T), яка охоплює основні види інфраструктури для пересування людей і вантажів по всій Європі, розширює перспективи інтеграції в європейський транспортний простір, формування нових міжнародних коридорів і зростання транзитного потенціалу. У майбутньому це дасть змогу збільшити обсяг перевезень автомобільним транспортом, скоротити логістичний час і впроваджувати цифрові технології управління рухом.

Водночас реалізація реформ потребує подолання суттєвих перешкод: корупційних факторів, обмеженого бюджетного забезпечення, значного зносу інфраструктури, а також руйнувань, що спричинені збройною агресією Російської Федерації. Тільки системний підхід і співпраця з європейськими партнерами дозволяють українському автомобільному транспорту повноцінно інтегруватися до європейського простору.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тематичний аналіз досліджень призводить до висновку, що розвитку транспортної сфери України присвячені різнопланові праці вітчизняних науковців, серед яких Дмитрієв І. С., Калат Ю. Я., Кирик І. М., Лебедева Л. Ю., Левченко Я. В., Максименко А. О., Никифоров О. В., Притула К. М., Стасюк О. М., Тютенко Н. А., Яцюта О. В. й ін. Науковці доводять, що сучасний розвиток транспортної сфери чітко визначається курсом на європейську інтеграцію [3, 5, 11, 12]. Цей курс передбачає не лише оновлення технічної частини інфраструктури, але й комплексну адаптацію нормативних регламентів та логістичних механізмів. Публікації Європейської комісії [13–16] свідчать про системну та поступову гармонізацію української транспортної політики з європейськими вимогами. Зокрема, імплементація положень TEN-T сприяла розширенню режиму бездозвілних міжнародних перевезень та запровадженню цифрових тахографів [3, 4].

Сучасні дослідження [17–20] зосереджуються на теоретичних і прикладних питаннях розбудови транспортно-логістичної інфраструктури України

в умовах євроінтеграційних процесів. Зокрема, аналізуються стійкість логістичних систем України та держав ЄС в умовах воєнного стану. При цьому увага приділяється навантаженню на прикордонні вузли, інвестиційним та експлуатаційним викликам. Окремий акцент зроблено на розвиток логістичних мереж у прикордонних областях, передусім у Західній Україні, які виконують функцію важливого транзитного «моста» до ЄС.

Узагальнення останніх досліджень і публікацій свідчить, що наближення України до ЄС у сфері автомобільного транспорту є багатовимірним процесом модернізації. Йдеться про оновлення нормативів, розвиток інфраструктури, впровадження новітніх технологій та зміну моделей управління й господарювання. Отже, ступінь готовності транспортної системи до повної інтеграції з європейським ринком визначатиме рівень конкурентності країни як у період війни, так і в умовах післявоєнного відновлення.

**Постановка завдання.** Метою статті є загальний аналіз розвитку автомобільного транспорту України в контексті європейської інтеграції з урахуванням основних нормативно-правових актів, що визначають стратегічні орієнтири модернізації автотранспортної галузі, а також розгляд основних напрямів реформ, зокрема у сфері адаптації українського законодавства до законодавства ЄС.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо загальний аналіз еволюції автомобільного транспорту України в контексті європейської інтеграції. У межах дослідження концептуально окреслимо основні положення, що визначають напрям реформ, а також тенденції модернізації галузі відповідно до європейських стандартів. При цьому варто виділити наступні аспекти.

Перший аспект. Автомобільний транспорт України перебуває у фазі глибоких трансформацій, що зумовлені євроінтеграційним курсом [10]. Основою цього процесу стала Угода про асоціацію з ЄС [2]. При цьому в Главі 7 «Транспорт» Розділу V «Економічне та галузеве співробітництво» та додатку XXXII визначено послідовне наближення національного законодавства до норм *acquis* ЄС у сфері автотранспорту. За даними звіту Європейської комісії від 8 листопада 2023 року [11] Україна вже частково інтегрувала вимоги щодо тахографів та встановила правила доступу до ринку міжнародних вантажних і пасажирських перевезень, що свідчить про поступове вирівнювання стандартів з європейськими [2, 3, 14].



Другий аспект. У контексті електронної системи стягнення плати за проїзд у ЄС в Україні поки що відсутній механізм дорожніх зборів, а користування автомобільними дорогами залишається безкоштовним [10].

Третій аспект. Технічний контроль транспортних засобів – національне законодавство лише частково адаптоване до вимог ЄС. Водночас темпи впровадження ключових реформ залишаються помірними. Не ухваленою залишається низка важливих законів щодо функціонування ринку автоперевезень, забезпечення безпеки колісного транспорту та регулювання соціальних умов роботи перевізників [13].

Крім того, у сфері соціального регулювання відносно норм тривалості керування та відпочинку водіїв, українське законодавство загалом узгоджене з європейським, однак окремі положення щодо режимів відпочинку залишаються невпровадженими [10].

Варто підкреслити, що у Звіті Європейської Комісії щодо України від 30 жовтня 2024 року [12] у частині, яка присвячена автомобільному транспорту, зазначено потребу у масштабних регуляторних трансформаціях та прийнятті низки законодавчих актів. Йдеться, зокрема, про ухвалення закону, що гармонізує транспортні послуги з європейськими стандартами [16]. Ці стандарти повинні забезпечити рівні конкурентні умови для українських перевізників на ринку ЄС та сприяти ефективній реалізації положень Угоди про автомобільний транспорт між Україною та ЄС [3].

Зауважимо, що в документі окремо акцентовується увага на важливості збалансованої реалізації Стратегії безпеки дорожнього руху. Вона має охоплювати всі чотири частини безпекової Системи: стан транспортної інфраструктури; технічну безпеку транспортних засобів; культуру та безпеку користування дорогами, а також якісну допомогу постраждалим у разі дорожньо-транспортних пригод.

У червні 2024 року строк дії Угоди про автомобільний транспорт, що передбачає тимчасову лібералізацію двосторонніх і транзитних перевезень між Україною та ЄС, було подовжено до 30 червня 2025 року [5, 10]. Загальний зміст документа полягає в тимчасовому спрощенні вантажних автоперевезень між сторонами, у тому числі транзитом через їхні території. Зокрема, шляхом розширення прав на перевезення для операторів, зареєстрованих у будь-якій із країн-учасниць. Такий крок обумовлений наслідками російської агресії проти України та значними порушеннями

роботи транспортної системи держави. Крім того, Угода включає положення про спрощення процедури взаємного визнання водійських документів.

Слід також наголосити, що 23 червня 2022 року лідери 27 держав ЄС ухвалили рішення надати Україні статус країни-кандидата на вступ до ЄС. Отримання цього статусу створює передумови для залучення фінансової підтримки, необхідної для модернізації державного управління, правового поля та економіки в процесі інтеграції до європейського простору, а також забезпечує збереження євроінтеграційного курсу серед ключових державних пріоритетів. У межах цього процесу Кабінет Міністрів України у 2023 році провів оцінку прогресу у приведенні національного законодавства у відповідність до правових норм ЄС та підготував Звіт за підсумками попередньої оцінки впровадження актів права ЄС [4].

У розділі «Транспортна політика» Звіту наголошено, що українське законодавство загалом уже охоплює більшість вимог європейського права. Водночас підкреслюється необхідність його подальшого вдосконалення для забезпечення повної та належної імплементації тих актів ЄС, які мають бути впроваджені на поточному етапі. Так, у сфері автомобільного транспорту необхідною є повна імплементація актів права ЄС щодо тахографів, плати за користування дорогами та дорожніх зборів, безпеки дорожнього руху, контролю придатності до експлуатації автомобільних транспортних засобів.

Відповідно до цього пріоритетним визначився розгляд та прийняття Верховною Радою України таких законопроектів: «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо приведення їх у відповідність із законодавством ЄС у сфері перевезення небезпечних вантажів» (реєстр. № 1193-1 від 20.09.2019); «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо суспільно важливих послуг з перевезення пасажирів автомобільним та міським електричним транспортом» (реєстр. № 4583 від 13.01.2021); «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо врегулювання ринку послуг автомобільного транспорту в Україні з метою приведення його у відповідальність з актом Європейського Союзу» (реєстр. № 4560 від 30.12.2020).

Слід відзначити, що на основі законопроекту (реєстр. № 4560 від 30.12.2020) Верховною Радою України 27 березня 2025 року прийнято Закон України «Про внесення змін до Закону України «Про автомобільний транспорт» щодо вдосконалення регулювання ринку послуг з перевезення

пасажирів і вантажів автомобільним транспортом» [1].

Законом України [1] установлюються спеціфічні правила ліцензування у сфері автомобільних перевезень відповідно до Регламенту ЄС № 1071/2009. Вводиться система сертифікації професійної компетентності менеджерів (керівників) з перевезень. Передбачається процедура підтвердження належної ділової репутації перевізників. Визначаються заходи впливу на суб'єктів автоперевезень та норми, що врегульовують питання адміністративних правопорушень при внутрішніх і міжнародних перевезеннях пасажирів та вантажів. Закон передбачає створення та функціонування Єдиного комплексу інформаційних систем у сфері безпеки наземного транспорту – інтегрованої інформаційно-комунікаційної структури. Вона охоплює автоматизовані системи, програмні та програмно-технічні рішення, засоби зв'язку й забезпечує обробку, захист даних та електронну взаємодію для надання відповідних послуг.

У Звіті за 2024 рік щодо виконання Угоди про асоціацію між Україною ЄС [5], який було присвячено автомобільному транспорту, зазначено, що розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24 грудня 2024 року № 1337-р була затверджена Стратегія розвитку прикордонної інфраструктури з країнами ЄС та Республікою Молдова до 2030 року, а також операційний план заходів для реалізації на період 2024-2030 років [6]. Крім того, 20 червня 2024 року підписана Угода між Україною та ЄС про внесення змін до Угоди про вантажні перевезення автомобільним транспортом. Угода передбачає продовження лібералізації вантажних перевезень до 30 червня 2025 року з можливістю додаткового продовження на шість місяців за умови дотримання положень Угоди.

У зв'язку з повномасштабним вторгненням російських військ в Україну, автомобільні перевезення виступають головним видом транспортування до країн ЄС. З цією метою було ухвалено постанову Кабінету Міністрів України від 18 червня 2024 року № 712 «Про внесення змін до Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів та небезпечних відходів автомобільним транспортом, а також міжнародних перевезень пасажирів і вантажів автомобільним транспортом» [7].

Ключовим стратегічним документом у сфері транспортної політики України є Національна транспортна стратегія на період до 2030 року (надалі – Стратегія), що затверджена Кабінетом

Міністрів України 27 грудня 2024 року, а також операційний план реалізації на 2025-2027 роки [8].

Метою Стратегії є відновлення транспортної системи України після руйнівних наслідків збройної агресії РФ на високому якісному рівні. Її подальший розвиток відповідно до політики та стандартів ЄС, зокрема принципів сталої, інклюзивної та кризостійкої мобільності, інтеграція у транспортну мережу ЄС і світову систему. Крім того, забезпечення безпеки руху, задоволення потреб населення та бізнесу у транспортних послугах, зміцнення обороноздатності держави, а також підвищення конкурентоспроможності та стійкості національної економіки.

Завдання Стратегії у сфері розвитку автомобільного транспорту України в контексті євроінтеграції передбачає: приведення законодавства щодо транспортних послуг та будівництва доріг у відповідність із міжнародними стандартами та acquis ЄС; запровадження прозорих, недискримінаційних і ефективних тарифів відповідно до принципів ЄС для розвитку інфраструктури та спрощення проєктів публічно-приватного партнерства; розвиток і технічне обслуговування автомобільних маршрутів транс'європейської транспортної мережі з урахуванням ролі міських вузлів і пропозицій сусідніх держав-членів ЄС.

До пріоритетних завдань Стратегії належить інтеграція України в управління транс'європейською транспортною мережею. Це включає участь у форумах транспортних коридорів ЄС, забезпечення технологічної та функціональної сумісності національної системи з європейською мережею, відновлення та розвиток автомобільних доріг з урахуванням євроінтеграції, а також оцінку ефективності державного та приватного партнерства у транспортних інвестиційних проєктах. Передбачено спрощення процедур міжнародних перевезень, полегшення обміну транспортними даними через інтеграцію IT-систем із системами ЄС та впровадження принципу «єдиного вікна».

Стратегія спрямована на нарощення пропускної спроможності автомобільної інфраструктури до кордонів із ЄС і Молдовою [6]. Крім того, розвиток інфраструктури альтернативних видів палива та відновлюваних джерел енергії, удосконалення сертифікації автомобільних транспортних засобів і створення єдиної електронної системи обміну даними (ETAES), поступове впровадження екологічного маркування авто за стандартами ЄС, відновлення норм «Євро-5» для вживаних автомобілів та розбудову мережі CNG-

заправок уздовж міжнародних коридорів у рамках ініціативи «Європейський зелений курс».

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2020 року № 1360-р було схвалено Стратегію підвищення безпеки дорожнього руху на період до 2024 року [9]. У контексті євроінтеграції її ключові напрямки передбачають: приведення законодавства у відповідність до європейських стандартів безпеки; посилення відповідальності за порушення правил дорожнього руху; регулювання використання персонального електротранспорту; запобігання дитячому дорожньому травматизму; підтримку розробки планів сталої міської мобільності територіальними громадами з урахуванням досвіду ЄС.

Стратегія щодо безпеки українських транспортних засобів у контексті євроінтеграції передбачає: реформування контролю технічного стану транспорту відповідно до Директиви 2009/40/ЄС; недопущення до руху транспортних засобів, включно з електромобілями, що не відповідають сучасним стандартам активної, пасивної та екологічної безпеки через гармонізацію нормативів із законодавством ЄС. Стратегія також має на меті забезпечення безпеки пасажирських і вантажних перевезень шляхом використання тахографів,

пасивних систем безпеки (ADAS) та обмежувачів швидкості для транспортних засобів понад 3,5 т відповідно до європейських вимог.

**Висновки.** У даному дослідженні розглянуто розвиток автомобільного транспорту України в контексті європейської інтеграції як один із пріоритетів державної політики. Визначено, що основою гармонізації законодавства для модернізації транспорту, підвищення безпеки руху, екологічності та конкурентоспроможності перевезень стала підписана у 2014 році Угода про асоціацію з ЄС.

Проаналізовано Національну транспортну стратегію до 2030 року, яка передбачає інтеграцію в європейську мережу TENT-T, оновлення доріг, розвиток мультимодальних перевезень і впровадження сучасних стандартів якості транспортних послуг. З'ясовано, що угода про вантажні перевезення з ЄС сприяє лібералізації міжнародних маршрутів та зміцненню позицій українських перевізників. При цьому впроваджуються екологічні стандарти «Євро-5».

Визначено, що попри наслідки збройної агресії РФ, Україна послідовно реалізує європейські інтеграційні зобов'язання, що забезпечує інтеграцію в єдиний транспортний простір ЄС, що є тематикою подальших досліджень.

#### Список літератури:

1. Про внесення змін до Закону України «Про автомобільний транспорт» щодо вдосконалення регулювання ринку послуг пасажирських і вантажних перевезень автомобільним транспортом : Закон України від 27.03.2025 № 4337-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2025. № 35. Ст. 135.
2. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони : міжнародна угода (у ред. від 14.10.2025). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011/conv](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011/conv) (дата звернення: 07.12.2025).
3. Угода між Україною та Європейським Союзом про вантажні автомобільні перевезення : міжнародна угода. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_001-22](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_001-22) (дата звернення: 07.12.2025).
4. Звіт за результатами первинної оцінки імплементації права Європейського Союзу (acquis ЄС). Кабінет Міністрів України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/zvit-UA.pdf> (дата звернення: 07.12.2025).
5. Звіт про виконання Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом за 2024 рік. Кабінет Міністрів України. URL: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/wp-content/uploads/Zvit-pro-vykonannya-Ugody-pro-asotsiatsiyuza-2024-rik.pdf> (дата звернення: 07.12.2025).
6. Про затвердження Стратегії розвитку та розширення прикордонної інфраструктури з країнами Європейського Союзу та Республікою Молдова до 2030 року та операційного плану її реалізації на 2024–2030 роки : розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.12.2024 № 1337-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1337-2024-%D1%80> (дата звернення: 07.12.2025).
7. Про внесення змін до Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів та небезпечних відходів автомобільним транспортом і міжнародних перевезень : постанова Кабінету Міністрів України від 18.06.2024 № 712. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/712-2024-%D0%BF> (дата звернення: 07.12.2025).
8. Про затвердження Національної транспортної стратегії України до 2030 року та операційного плану її реалізації на 2025–2027 роки : постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF> (дата звернення: 07.12.2025).
9. Стратегія підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.10.2020 № 1360-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1360-2020-%D1%80> (дата звернення: 07.12.2025).

10. Дослідницька служба Верховної Ради України : офіц. вебсайт. URL: <https://research.rada.gov.ua/> (дата звернення: 07.12.2025).
11. Ukraine 2023 Report : Commission staff working document (SWD(2023) 699 final). European Commission, 2023. URL: [https://enlargement.ec.europa.eu/system/files/2023-11/SWD\\_2023\\_699%20Ukraine%20report.pdf](https://enlargement.ec.europa.eu/system/files/2023-11/SWD_2023_699%20Ukraine%20report.pdf) (дата звернення: 07.12.2025).
12. Ukraine 2024 Report : Commission staff working document. European Commission, 2024. URL: [https://enlargement.ec.europa.eu/document/download/1924a044-b30f-48a2-99c1-50edeac14da1\\_en](https://enlargement.ec.europa.eu/document/download/1924a044-b30f-48a2-99c1-50edeac14da1_en) (дата звернення: 07.12.2025).
13. Ukraine Report 2025 : Enlargement Package. European Commission, 2025.
14. EU and Ukraine extend recognition of smart tachographs : news, 17 January 2025. European Commission, 2025.
15. Connecting Europe Facility (CEF): Cross-border TEN-T projects. European Commission, 2025.
16. Official screening of legislation for TEN-T alignment. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2025.
17. Полюх А. Транспортна інфраструктура в умовах тривалої війни: виклики та пріоритети. Київ : KSE Institute, 2025. URL: [https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/08/Transport-Infrastructure-Amid-Protracted-War\\_Poliukh-Artem.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/08/Transport-Infrastructure-Amid-Protracted-War_Poliukh-Artem.pdf) (дата звернення: 07.12.2025).
18. Lebedeva L. Resilience of transport logistics in EU and Ukraine during the Russian-Ukrainian war. *Foreign Trade*. 2024. URL: <https://journals.knute.edu.ua/foreign-trade/article/view/2142> (дата звернення: 07.12.2025).
19. Prytula K. M., Maksymenko A. O., Kalat Y. Ya., Kyryk I. M. Development of the logistics and transport infrastructure of the border regions of Western Ukraine in the context of deepening integration with the European Union. 2023. URL: <https://www.researchgate.net/publication/376217896> (дата звернення: 07.12.2025).
20. Tyukhtenko N. Topical issues of formation of transport and logistics infrastructure of Ukraine in the conditions of European integration and global challenges. *Economic Sustainability and Business Practices*. 2024. № 3. DOI: <https://doi.org/10.21272/esbp.2024.3-02>.

#### **Volobuyeva T.V., Kuvshinov A.O., Minakov V.M., Stepanov O.V. CONCEPT OF DEVELOPMENT OF MOTOR TRANSPORT IN UKRAINE IN THE CONTEXT OF EUROPEAN INTEGRATION**

*The article considers the concept of road transport development in Ukraine in the context of European integration. Accordingly, the aim of the study is to provide a general analysis of road transport development in Ukraine in the context of European integration, taking into account the main regulatory and legal acts that define the strategic guidelines for the modernization of the road transport industry in the field of Ukrainian legislation in line with European Union legislation. The study summarizes the evolution of road transport in Ukraine and identifies the main trends in modernization and reform in accordance with European standards. It shows that Ukrainian road transport is undergoing profound transformations. At the same time, the slow pace of legislative reforms is noted. Attention is paid to the legislative regulation of the road transport market, which ensures equal competitive conditions for Ukrainian carriers in the EU market. In particular, the implementation of the Road Safety Strategy, which covers infrastructure, technical safety, road use culture, and assistance to victims. Key Ukrainian draft laws on the harmonisation of transport services with European standards are being considered. The importance of the National Transport Strategy until 2030 is emphasized, which aims to restore and develop the transport system after Russian aggression, integrate into the Trans-European Transport Network (TEN-T), develop multimodal transport, introduce Euro 5 environmental standards, and ensure a sustainable, safe, and competitive transport infrastructure. It is concluded that, despite difficult external factors, Ukraine is consistently implementing its European integration commitments, which creates the basis for further reforms and integration into the single EU transport space.*

**Keywords:** road transport, development, European integration, Ukrainian legislation, EU legislation, Ukrainian transport policy.

Дата першого надходження статті до видання: 13.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Дощенко Г.Г.**

<https://orcid.org/0000-0002-1004-4934>

Херсонська державна морська академія

**Наговський Д.А.**

<https://orcid.org/0000-0001-6920-0324>

Херсонська державна морська академія

## МЕТОДОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ПАРАМЕТРИЧНИХ ВІДМОВ

У статті пропонується методичний підхід до оцінки технічного стану суднового електрообладнання на основі аналізу динаміки параметричних відмов. Актуальність цієї роботи впливає з необхідності переходу від планового технічного обслуговування до стратегії технічного обслуговування за станом (СВМ), яка дозволяє запобігати раптовим відмовам обладнання.

Розглядається процес поступового формування відмов у технічних системах. Описано модель для ймовірнісної оцінки вихідної аварійної події або стану, спричиненого цим явищем. У дослідженні уточнено поняття «небезпечного стану» та його синоніма (за певних умов) «граничного стану». Досліджено можливі причини досягнення граничного стану, що призводить до повного виведення обладнання з експлуатації. Зокрема, у дослідженні проаналізовано критичні параметри, що визначають граничний стан виробу.

Встановлено, що під час експлуатації суднового обладнання граничне значення критичного параметра може коливатися. Представлено модель поступового формування відмов, що враховує фактори, що негативно впливають на роботу обладнання. Автори зазначають, що ймовірність безпечної експлуатації зменшується зі зносом та старінням обладнання, що призводить до постійного зміщення граничного значення.

Дослідження базується на моделюванні процесів деградації ключових характеристик у суднових електричних системах. Автори визначили ключові діагностичні індикатори, що сигналізують про початок параметричних змін до функціонального збою або аварійного вимикання.

Результати цієї роботи підвищують точність прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання та оптимізують графіки технічного обслуговування. Запропонована методологія може бути впроваджена в енергетичному секторі та в автоматизованих системах моніторингу промислових об'єктів.

**Ключові слова:** електрообладнання, технічний стан, параметрична відмова, діагностування, залишковий ресурс, ймовірність, старіння ізоляції.

**Постановка проблеми.** Безпека експлуатації судна насамперед визначається його технічним станом. Досвід експлуатації морських суден підтверджує важливість комплексної реалізації конструктивних заходів на етапі будівництва самого судна. Однак підтримання заданого рівня технічної готовності судна, забезпечення його справного технічного стану загалом та працездатності окремих вузлів та механізмів залежать від загальної організації технічної експлуатації та побудови усієї системи технічного забезпечення. На даному

етапі можна виділити декілька основних складових, пов'язаних із забезпеченням безпечної та ефективної експлуатації морського транспорту.

По-перше, слід зазначити якість професійної підготовки екіпажів суден. Керівними документами, зокрема Міжнародною конвенцією «Про підготовку та дипломування моряків та несення вахти» (ПДНВ), встановлюються стандарти знань, розуміння, досвіду та професійної компетентності членів екіпажів морських судів. Забезпечення даних стандартів компетентності та



професіоналізму моряків покликане забезпечити охорону людського життя, майна та навколишнього середовища. Тому професійна підготовка членів екіпажів судів включає формування компетенцій в галузі технічного обслуговування, проведення регламентних робіт і ремонтів [1].

Однак для визначення ступеня готовності системи та оцінки її технічного стану в процесі експлуатації судна поряд із традиційними показниками необхідно враховувати вплив людського фактора. Як відомо, людський фактор у будь-якій технічній системі є слабоформалізованим явищем і неминуче робить всі такі системи імовірними. Виходячи з імовірнісної природи цього явища, звичайні методи оцінки та прогнозування рівня технічної готовності виявляються неефективними. Для зниження впливу цього явища слід впроваджувати в систему управління технічною експлуатацією нові методи організаційного контролю, технології та системи автоматизованого контролю, а також удосконалені методи оцінки технічної готовності судна, що наочно відображають її рівень з урахуванням людського фактора. Такий підхід дозволяє прогнозувати можливі технічні події та відмови, а також своєчасно визначати та усувати передумови до їх виникнення [2].

По-друге, слід враховувати необхідність наявності бази технічного обслуговування судів. Такі підрозділи вирішують завдання усунення дефектів різного обладнання, відновлення робочих властивостей окремих деталей, виготовлення нових деталей або спеціальних пристроїв і т. д. Основна роль бази технічного обслуговування полягає у збільшенні можливостей відновлення заданого рівня технічної готовності судна в період проведення регламентних робіт за рахунок додаткових виробничих потужностей. Бази технічного обслуговування можуть формуватися з урахуванням берегових ремонтно-технічних станцій (БРТС), окремих судноремонтних майстерень (СРМ) чи ремонтно-експлуатаційних баз (РЕБ). Також можливе формування рухомих ремонтно-експлуатаційних комплексів на основі плавучих майстерень (ПМ). В останньому випадку можливе якісне забезпечення проведення великого обсягу регламентних та відновлювальних робіт безпосередньо у морі чи у часових пунктах базування судів [3].

Зі збільшенням на судах цифрового обладнання та мікропроцесорної техніки виникає необхідність створення спеціалізованого інформаційно-технічного центру з обслуговування та забезпечення працездатності даного виду обладнання. Враховуючи високий рівень автоматизації сучасних судів

і широкий спектр застосовуваних мікропроцесорних систем, необхідність такого спеціалізованого центру очевидна. Для реалізації комплексного підходу за цим напрямом даний центр повинен бути універсальним і багатофункціональним. Це, у свою чергу, вимагає об'єднання та централізації ресурсів, зосередження матеріально-технічного, виробничого та кадрового потенціалу в рамках регіонального інформаційно-технічного центру.

По-третє, важливу роль підтримки на заданому рівні технічної готовності судів грає система матеріально-технічного забезпечення. Під поняттям «матеріально-технічне забезпечення» мається на увазі ціла низка необхідних заходів щодо повної комплектації судна для його подальшої експлуатації. Система матеріально-технічного забезпечення вирішує завдання забезпечення судів матеріалами та запасами за номенклатурою та в кількостях, необхідних для їх ефективної експлуатації та безпечного плавання. Під зазначеними матеріалами розуміються певне технічне обладнання, запасні частини, інструмент, пристрої, запаси води, ПММ та інші витратні матеріали, необхідні для нормальної експлуатації судна та підтримки його технічної готовності [3].

Збільшення кількості різних проектів судів з використанням на них обладнання різних типів, марок та виробників підриває надійність матеріально-технічного забезпечення. Збільшення обсягів номенклатури втрачає сенс, оскільки в таких умовах частина матеріальних запасів може виявитися незатребуваною. У цьому випадку системі постачання доводиться працювати практично «з коліс» під конкретні замовлення, що істотно знижує її ефективність. При цьому масове використання обладнання іноземних виробників ще більше посилює ситуацію, оскільки з'являються додаткові економічні, логістичні, а в сучасних умовах ще й політичні ризики.

Зниження даних ризиків та підвищення стійкості є актуальним завданням у системі матеріально-технічного забезпечення. Загальна уніфікація судів та судового обладнання за сучасних умов практично неможлива. Однак слід розуміти та комплексно оцінювати вплив даного фактора на ефективність системи матеріально-технічного забезпечення. Нівелювати ризики, що виникають, і забезпечити необхідну ефективність дозволяє застосування системи автоматизованого обліку матеріальних запасів. Такі автоматизовані системи підвищують оперативність управління матеріальними запасами, надають всій системі постачання додаткову маневреність і можливість

своєчасно адаптуватися до умов, що змінюються.

Четвертим, базовим елементом ефективної технічної експлуатації морського транспорту є система судноремонту. Основним завданням, вирішуваної у ході планових ремонтів судів, є відновлення їх технічних характеристик рівня, що дозволяє забезпечити ефективну та безпечну експлуатацію судна в міжремонтний період. Додатково в період планових ремонтів можуть вирішуватись завдання покращення або зміни характеристик судна або окремих видів обладнання шляхом проведення додаткових робіт з реконструкції, модернізації або переобладнання судна [4].

Ремонт суден є складним технологічним процесом, що включає в себе безліч окремих технологій. Для реалізації цих технологій та вирішення головних завдань судноремонту потрібен висококваліфікований персонал. Підготовка фахівців, створення та заохочення системи передачі досвіду, формування кадрового потенціалу підприємства – важливе завдання і визначальний фактор у питаннях забезпечення ефективності всього судноремонтного комплексу.

Сучасний етап розвитку морського флоту характеризується стрімким ускладненням судових електротехнічних систем та підвищенням вимог до їхньої надійності, безпеки й економічної ефективності. Традиційно на судах переважає регламентна стратегія технічного обслуговування, яка ґрунтується на календарних термінах або напрацюванні в мотогодинах. Однак такий підхід має суттєві недоліки: він не враховує індивідуальну інтенсивність зносу обладнання та не здатний ефективно запобігати раптовим параметричним відмовам.

Ключові аспекти проблеми:

- Ризик раптових відмов: Параметричні зміни (поступове погіршення характеристик через старіння, корозію чи вібрацію) часто залишаються непомітними під час стандартних перевірок, що призводить до непередбачуваного виходу обладнання з ладу в рейсових умовах.
- Економічна неефективність: Регламентний ремонт часто передбачає заміну вузлів, які ще мають значний ресурс, або навпаки – не встигає запобігти аварії, що веде до дороговартісних простой судна.
- Складність діагностування: Процеси деградації характеристик судових систем мають прихований динамічний характер. Відсутність чітко визначених діагностичних ознак, які сигналізують про перехід системи від нормального стану до

критичного (до моменту повного заклинювання або спрацювання захисту), ускладнює впровадження систем автоматизованого моніторингу.

- Необхідність переходу до нових стратегій: Існує гостра потреба у розробці науково обґрунтованих методологій експлуатації за фактичним станом. Це потребує створення моделей, здатних аналізувати динаміку деградаційних процесів та з високою точністю прогнозувати залишковий ресурс електрообладнання.

Таким чином, вирішення проблеми оцінювання технічного стану на основі аналізу динаміки параметричних відмов є критично важливим для підвищення живучості судна, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення безперебійної роботи енергетичних систем у складних морських умовах.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

У сучасній науковій літературі питання діагностики технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу складних технічних систем розглядається з використанням різних підходів, включно з ймовірнісними, математичними моделями та інтелектуальними системами. Зокрема, дослідження Данильченка та Потривая пропонують нейро-нечіткі моделі для динамічного прогнозування технічного стану енергетичного обладнання, що дозволяє враховувати динамічні зміни стану об'єкта в умовах реального навантаження [11]. Подібні підходи до параметричної діагностики, основані на аналізі темпів змін параметрів, пропонуються для судових механізмів, зокрема з метою оперативної оцінки технічного стану дизельних установок за даними бортових приладів [12]. В контексті моніторингу судових енергетичних систем застосовуються ймовірнісні моделі, зокрема побудовані на ланцюгах Маркова, які дозволяють інтегрувати багатофакторні впливи на систему та підвищити точність прогнозування технічних параметрів [13]. Крім того, аналітичні та ймовірнісні методи прогнозування технічного стану, що базуються на статистичних та машинно-навчальних підходах, показують перспективність для оцінювання залишкового ресурсу обладнання в складних умовах експлуатації транспортних систем. Однак у більшості сучасних робіт все ще присутня потреба у глибшому вивченні природи параметричних відмов саме для судового електрообладнання з урахуванням морських умов експлуатації, що зумовлює актуальність подальших досліджень у цій галузі.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка та обґрунтування методологічного під-



ходу до оцінювання технічного стану суднового електрообладнання на основі аналізу динаміки параметричних відмов для забезпечення переходу до стратегії експлуатації за фактичним станом та підвищення точності прогнозування залишкового ресурсу.

**Виклад основного матеріалу.** Морська галузь, що охоплює понад 80% світового товарообігу, перебуває на етапі системних змін. Ця трансформація базується на впровадженні штучного інтелекту, IoT та кіберфізичних технологій у судноплавство. За даними звіту UNCTAD (2024), при обсягах у 12 млн рейсів за минулий рік, очікується подальше щорічне збільшення показників на 2,4% до 2029 року [5]. Інтенсифікація перевезень зумовлює зростання експлуатаційного тиску на технічне обладнання, передусім на електроенергетичні комплекси, які є засадничими для безпеки та функціонування суден.

За статистикою Європейського агентства з морської безпеки (EMSA), викладеною у звіті «Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024», несправності технічних систем та агрегатів залишаються однією з головних причин аварійності на флоті. Протягом 2014–2022 років технічні відмови зумовили 25,3% усіх морських подій. Примітно, що хоча цей чинник посідає друге місце після помилок навігації, саме вихід обладнання з ладу нерідко є детермінантою подальших помилок екіпажу [6].

Фундаментальним поняттям теорії безпеки є поняття «небезпечний стан», перехід у який може завдати об'єкту шкоди великого масштабу. Одна з причин попадання об'єкта в небезпечний стан – перевищення критичним параметром його граничного значення. У цьому випадку термін «небезпечний стан» є синонімом терміну «граничний стан», який визначається як стан виробу, при якому його подальша експлуатація має бути припинена через непереборне порушення вимог безпеки або непереборного догляду заданих параметрів за встановлені межі...» [7].

Граничний стан настає при поступових відмовах. Поступові відмови іноді називають параметричними. Параметрична відмова – це вид

відмови, при якому виріб або система перестає відповідати встановленим нормам, але при цьому зберігає свою працездатність (хоч і з погіршеними характеристиками). Простіше кажучи, пристрій все ще працює, але його ключові параметри «плинули» за допустимі межі.

На відміну від раптової (повної) відмови, коли прилад просто перестає вмикатися або виконувати свою функцію, параметрична відмова характеризується поступовістю.

Причиною параметричної відмови найчастіше це природні процеси старіння, знос, корозія чи зміна фізико-хімічних властивостей матеріалів. Проявляється цей стан у наступному: зниження точності, падіння потужності, збільшення витрат палива, поява шумів або вібрацій. Таку відмову складно помітити «на око» без спеціальних вимірювальних приладів.

З погляду безпеки відбувається поступова зміна критичного параметра внаслідок старіння та зносу, порушення процедур ведення технологічного процесу, відмови автоматики, контрольно-вимірювальної апаратури, внаслідок неготовності засобів протипожежного захисту тощо. [8]

Розглянемо у загальному плані область зміни критичного параметра, обмежену його граничними значеннями, у якій об'єкт працездатний, яке функціонування безпечне (рис. 1).

Область зміни параметра включає дві допустимі зони в тому випадку, якщо на параметр накладаються двосторонні обмеження. При односторонньому обмеженні маємо одну допустиму область. Надалі для стислості розглядається випадок, коли робоче значення завжди менше допустимого, а останнє завжди менше граничного, тобто  $Z_{\text{н}} < Z < Z_{\text{пр}}$ .

На практиці експлуатації різних об'єктів, у тому числі суднових технічних засобів (СТЗ), для того щоб не допускати стан об'єкта до граничного (небезпечного) стану, зазвичай призначають деяке проміжне (допустиме) значення параметра  $Z_{\text{д}}$ , досягнення якого дає інформацію про близькість граничного значення.

Для будь-якого критичного параметра можна виділити три області його значень: робочу, допус-

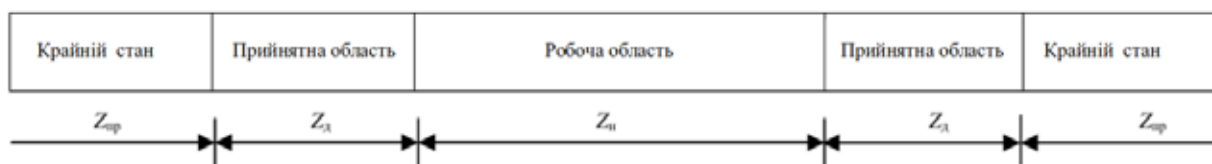


Рис. 1. Область зміни критичного параметра

тиму та небезпечну. У робочій області значення параметра завжди менше допустимого, тобто  $Z < Z_d$ . У ній знаходяться номінальне та поточне значення. Допустима область розташована між допустимим і граничним значеннями, та для неї справедлива умова  $Z_d < Z < Z_{np}$ . В допустимій області функціонування об'єкта можливе, але різко підвищується ймовірність виникнення аварії. В небезпечній області значення параметра перевищує граничне значення. При переході параметра значення  $Z_{np}$  завжди настає граничне, тобто небезпечний стан.

Розглянемо модель формування поступової відмови у фіксований час, припускаючи, що зміна параметра відбувається дуже повільно. Значення параметрів аналізованого об'єкта змінюються у межах робочої області  $Z_n < Z < Z_d$  під впливом будь-яких з перерахованих вище причин та випадкових впливів. Для певності припустимо, що ймовірнісний розподіл значень параметра підпорядковується нормальному закону з математичним очікуванням  $m_z$  та середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_z$ . У свою чергу, під впливом детермінованої складової  $m_z$  і  $\sigma_z$  можуть набувати певних значень в різних умовах експлуатації, на різних етапах старіння і зносу і при управляючих та збурювальних впливах.

На рис. 2 зображена щільність розподілу значень критичного параметра області його можливої зміни. Пунктиром показаний закон розподілу при математичному очікуванні рівному номінальному значенню параметра ( $m_z = Z$ ), суцільною лінією – при  $m_z = Z_d$ .

Для законів, зображених на рис. 2,  $\sigma_1 < \sigma_z$ .

З рис. 2 видно, що можливість виходу значення параметра  $O_z$  межі  $Z_{np}$  залежить як від  $m_z$ , і від

$\sigma_1$ . Для законів розподілу, зображених на рис. 2, у першому випадку вона практично дорівнює нулю, у другому – заштрихованої площі  $S$ . Для нормального закону розподілу [3], що найчастіше використовується при вимірах, ймовірність дорівнює:

$$Q_z(Z \geq Z_{np}) = 1 - \Phi\left(\frac{Z_{np} - m_z}{\sigma}\right), \quad (1)$$

де  $\Phi\left(\frac{Z_{np} - m_z}{\sigma}\right)$  – функція Лапласа.

Вираз (1) дозволяє визначити ймовірність знаходження параметра у безпечній області  $P_z = 1 - O_z$  за будь-якого зміщення середнього значення межах аналізованої області  $Z_n < Z < Z_d$ . За зміни середнього значення  $m_z = Z_k$  від  $Z_n$  до  $Z_{np}$  ( $Z_k$  – конкретне значення випадкової величини в інтервалі від  $Z_n$  до  $Z_{np}$ ) значення шуканої ймовірності зменшується від 1 до 0,5 (рис. 3).

У промисловості, авіації та при використанні для перевезення вантажів морськими суднами параметричні відмови часто є провісниками катастрофічних поломок. Якщо вчасно помітити, що параметр почав «дрейфувати» до критичної позначки, можна провести технічне обслуговування до того, як система повністю вийде з ладу.

Для суднового електрообладнання (СЕО) розрахунок та запобігання параметричним відмовам мають критичне значення, оскільки морське середовище (сіль, вологість, вібрація) прискорює «дрейф» характеристик.

Основним показником для суднового електрообладнання є можливість його безвідмовної роботи  $P(t)$ . Для електроустаткування найчастіше використовується експоненціальний закон розподілу, який справедливий для періоду нормальної

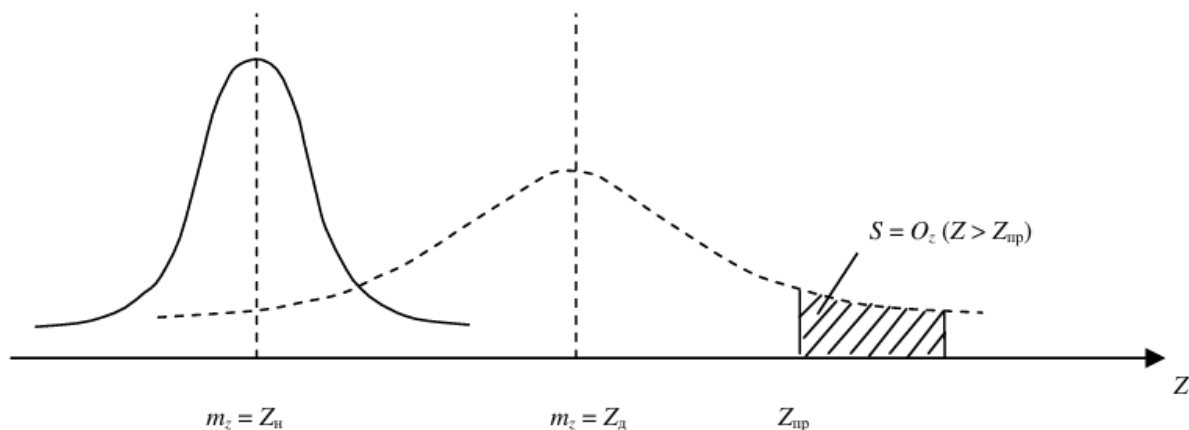


Рис. 2. Щільність розподілу значень критичного параметра

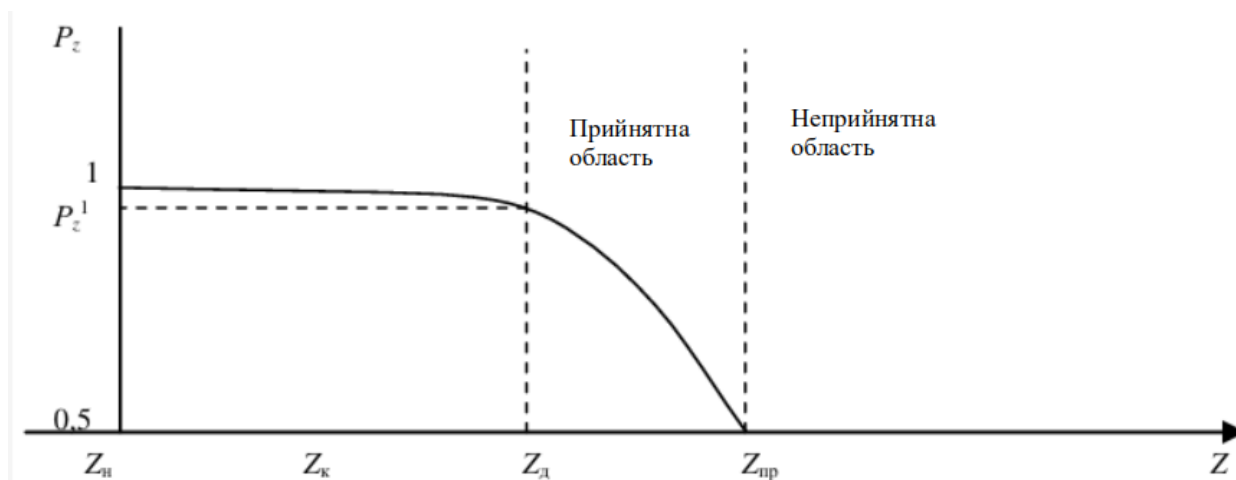


Рис. 3. Визначення ймовірності знаходження параметра у безпечній області

експлуатації (після опрацювання і до початку масового зносу).

Формула ймовірності:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов (кількість відмов в одиницю часу, для СЕО часто береться з довідників або даних морського реєстру судноплавства та органу державного нагляду за суднами внутрішнього флоту);

$t$  – час роботи (напрацювання в годинах);

$e$  – основа натурального логарифму (приблизно 2,718).

Оскільки параметрична відмова – це вихід параметра  $x$  за допустимі межі  $[x_{min}, x_{max}]$ , ймовірність розраховується через функцію розподілу цього параметра:

$$P(t) = P(x_{min} < x(t) < x_{max}).$$

На судах для цього часто застосовують статистичний контроль: якщо ми бачимо, що опір ізоляції двигуна Ri80 знижується зі швидкістю  $v$ , ми можемо розрахувати час до досягнення критичного порога цього показника (наприклад, 0,5 МОм). [8]

Методи запобігання на судні

Профілактика на флоті будується на системі PMS (Planned Maintenance System).

### 1. Тренд-аналіз (Condition Monitoring):

– Замість того щоб просто перевіряти «працює/не працює», механіки та електромеханіки записують чисельні значення (наприклад, струм витoku або температуру обмоток).

– Якщо графік показує стійке зниження параметра, обслуговування призначається до досягнення критичної точки.

### 2. Тепловізійний контроль:

– Дозволяє виявити параметричну відмову контактних з'єднань у ГРЩ (головному розподільчому щиті). Зростання температури на 10–20°C говорить про зростання перехідного опору, хоча світло на судні ще не згасло.

### 3. Контроль ізоляції під навантаженням:

– Використання приладів безперервного контролю ізоляції (типу Bender). Вони дозволяють помітити параметричну відмову ізоляції на ранній стадії, коли волога тільки почала проникати в кабель.

Для судового електрообладнання вкрай важливо дотримуватись періодичності вимірів опору ізоляції (зазвичай раз на місяць або після тривалих стоянок). Параметрична відмова ізоляції – це найчастіша причина спрацювання захисту та подальшого знеструмлення судна (blackout).

Для забезпечення надійності та запобігання раптовому знеструмленню судна (Blackout),

Таблиця 1

Приклади параметричних відмов у судових системах

| Обладнання     | Контрольований параметр | Причина «дрейфу»                                     |
|----------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
| Генератор      | Напруга та частота      | Старіння елементів регулятора (AVR), знос щіток      |
| Електродвигуни | Опір ізоляції           | Зволоження, осідання солі, теплове старіння лаку     |
| Акумулятори    | Внутрішній опір         | Сульфатація пластин, википання електроліту           |
| Контактори     | Перехідний опір         | Підгоряння та окислення контактів у солоному повітрі |

нижче представимо чекліст для контролю параметрів аварійного дизель-генератора (АДГ) та його систем [9].

Цей перелік сфокусований саме на параметричних змінах, які можна виміряти, перш ніж станеться поломка.

Щоб ефективно передбачати відмову, електро-механік повинен використовувати метод порівняння з попереднім вимірюванням, а саме:

1. Для опору ізоляції: Якщо минулого місяця було 50 МОм, а цього – 5 МОм, це вже параметрична відмова, викликана зволоженням або забрудненням, навіть якщо норма в 0,5 МОм ще не досягнута.

2. Для перехідного опору: У суднових умовах вібрація послаблює затискачі. Зростання падіння напруги на клеммах всього на 0,5 може призвести до перегріву і розплавлення клемної коробки.

Для судового електрообладнання найефективнішим методом щодо запобігання параметричної відмови є «Карта трендів». При цьому методі важливо записувати значення опору ізоляції ГРЩ і АДГ у спеціальний журнал одночасно (наприклад, першого числа кожного місяця). Різка зміна кута нахилу кривої на графіку – це сигнал до негайного огляду, навіть якщо система працює штатно.

Розглянемо головні автоматичні вимикачі (АВ) на судні – це критичні вузли, де параметрична відмова може призвести до пожежі або до повної втрати ходу. Неспрацювання автоматичного вимикача в умовах короткого замикання створює ризик повного знеструмлення судна (blackout). Головними чинниками таких збоїв є ерозія контактних поверхонь та деградація приводного механізму [10].

На відміну від простої лампочки, АВ виходять з ладу «тихо»: вони можуть роками виглядати справними, але в потрібний момент не

спрацювати або навпаки відключитися без причини.

Особливості параметричних відмов АВ на судні

1. Проблема «спікання» мастила: На судах АВ часто перебувають у режимі очікування місяцями. Мастило в механізмі взводу пружин під впливом температури в щитовій висихає і перетворюється на «клей».

– Відмова: АВ зовні справний, але при команді «Пуск» або «Захист» механізм заїдає.

– Профілактика: Регулярне очищення та використання спеціальної морської мастила (наприклад, Molykote), яка не втрачає властивостей при вібрації.

2. Ерозія дугогасних камер: Після кожного спрацювання під навантаженням усередині камер осідає металевий пил.

– Відмова: Зниження діелектричної міцності повітря всередині АВ. При наступному КЗ дуга може не згаснути, що призведе до вибуху вимикача.

– Профілактика: Чищення камер пиłosосом (не стисненим повітрям, щоб не загнати пил глибше!) після кожних 2-3 серйозних спрацювань.

Як уникнути Blackout: правило 3-х кроків

1. Щомісяця: Візуальний огляд через оглядові вікна та тепловізійний контроль усіх доступних з'єднань ГРЩ.

2. Раз на півроку: Тестування функції «Trip» (якщо дозволяє експлуатаційна обстановка) – перевірка того, що механічний зв'язок між розчіплювачем та замком працює чітко.

3. Щорічно (у доці або при стоянці): Викочування АВ, повне очищення, перевірка «провалу» контактів та замір перехідного опору.

Порада профі: Звертайте увагу на лічильник циклів (Operations Counter). Якщо кількість спрацювань наближається до ресурсу, вказаному виробником (зазвичай 2000-5000 циклів під

Таблиця 2

Чекліст контролю параметрів АДГ

| Вузол / Система   | Параметр                            | Норма (приблизна)         | Тривожний тренд (Параметрична відмова)                 |
|-------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|
| Генератор         | Опір ізоляції обмоток               | > 100 МОм (на холодну)    | Падіння нижче 2 МОм (потрібне сушіння)                 |
| Система пуску     | Напруга АКБ під навантаженням       | 24 В (просідання до 22 В) | Падіння нижче 18-20 В під час прокручування            |
| Паливна система   | Час виходу на номінальні обороти    | < 10 секунд               | Збільшення часу до 15+ секунд (засмічення фільтрів)    |
| Контактні групи   | Температура з'єднань (тепловізор)   | < 45° C                   | Зростання температури вище 70° C (окислення контактів) |
| Зарядний пристрій | Струм підзаряду в режимі очікування | 0.5 – 2 А                 | Струм близький до 0 або постійно максимальний          |

Таблиця 3

**Чеклист технічного обслуговування головного автоматичного вимикача (АВ)**

| Параметр                      | Що перевіряємо (Метод)                                      | Норма / Дія                                          | Симптом параметричної відмови                                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Перехідний опір контактів     | Замір мікроомметром (Ducter test) на замкнутому ГВ          | < 50 мкОм (залежить від моделі)                      | Зростання опору через окислення або ерозію срібного наплаву                       |
| Час спрацювання               | Перевірка таймінгу розчеплювачів (Secondary Injection Test) | Повинно суворо відповідати карті селективності судна | «Дрейф» уставок (повільне спрацювання веде до вигорання всієї секції ГРЩ)         |
| Температура шин та затискачів | Тепловізійна зйомка під навантаженням                       | Різниця температур фаз не більше 5-10° С             | Локальне перегрів («Hot spot») – ознака послаблення болтового з'єднання           |
| Опір ізоляції                 | Мегаомметр (500В/1000В) між полюсами та на корпус           | > 100 МОм                                            | Падіння ізоляції через вугільний пил (продукти горіння дуги)                      |
| Механічний знос               | Візуальний огляд дугогасних камер та головних контактів     | Відсутність тріщин, сколів та сильного нагару        | Збільшення зазору (wire) веде до неповного притискання контактів та їх оплавлення |

Таблиця 4

**Чеклист контролю параметрів систем АПС**

| Вузол системи                         | Контрольований параметр              | Норма / Дія                               | Симптом параметричної відмови                                                   |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Аналогові датчики (тиск, температура) | Вихідний сигнал (струм/напруга)      | 4–20 мА чи 0,5–4,5 В                      | «Дрейф нуля»: датчик показує 0,2 бар при фактичному нулі                        |
| Канали зв'язку (Data Bus)             | Рівень шумів та помилок (Error Rate) | Мінімальна кількість помилок пакетів      | Періодичне зникнення зв'язку з віддаленим блоком (Intermittent fault)           |
| Блоки живлення (UPS/PSU)              | Напруга та пульсації (Ripple)        | 24 В DC ( $\pm 5\%$ ), пульсації < 100 мВ | Просідання напруги при включенні сирен/маяків                                   |
| Релейні виходи                        | Релейні виходи                       | < 1 Ом у замкнутому стані                 | Окислення контактів: АПС дає сигнал на зупинку двигуна, але реле не замикається |
| Детектори диму                        | Поріг задимленості (Obscuration)     | Відповідність паспортному значенню        | Забруднення камери: спрацювання при нормальному повітрі                         |

навантаженням), ризик параметричної відмови механіки зростає у геометричній прогресії.

Система АПС (Alarm and Monitoring System – AMS) – це «нервова система» судна. Параметрична відмова тут особливо небезпечна: система може продовжувати працювати, але видавати помилкові тривоги (False Alarms) або, що ще гірше, ігнорувати реальну небезпеку через «замилений» чи зміщений діапазон чутливості датчиків.

Специфічні параметричні відмови АПС:

1. «Дрейф» аналогових сигналів (4-20 мА)

Це найпідступніший вид відмови. Через старіння електроніки або влучення вологи в клемну коробку датчика опір ланцюга змінюється.

• Результат: Датчик температури вихлопних газів показує 380° С, хоча реальна температура – 420° С. Захист не спрацює і двигун отримує пошкодження.

• Як запобігти: Регулярне калібрування за допомогою еталонного манометра або калібруатора температури (термостату).

2. Деградація оптичних пар

У датчиках полум'я або масляного туману (Oil Mist Detector) стоять ІЧ-діоди та фотоприймачі. Згодом їхня яскравість падає, а лінзи каламутніють.

• Відмова: Система знижує чутливість, щоб уникнути помилкових спрацювань, і може «проспати» реальну пожежу або вибух у картері.

- Профілактика: Щотижнева перевірка вбудованим тестом (Self-test) та очищення оптики спеціальними засобами.

### 3. Ємність буферних батарей

Система АПС має працювати при знеструмленні судна.

- Відмова: Батарея показує 24 (напруга в нормі), але при реальному відключенні живлення «сідає» за 2 хвилини замість 30.

- Профілактика: Тест під реальним навантаженням (Battery Capacity Test) раз на півроку.

#### Практичні поради для електромеханіка

1. Контроль «Землі» (Earth Fault): Поява «землі» в низьковольтних ланцюгах АПС (24 В) – це початок параметричної відмови ізоляції [14]. Навіть невеликий витік може викликати наведення, через які аналогові значення почнуть стрибати.

2. Аналіз помилкових спрацьовувань [15]: Якщо один і той же датчик дає «False Alarm» раз на тиждень – це не випадковість, а параметрична відмова (знос мембрани або корозія роз'єму). Чи не «загрублюйте» уставку, а змініуйте датчик.

3. Температурний режим у процесорних блоках: Перегрів контролера АПС у центральному посту управління (ЦПУ) веде до уповільнення обробки сигналів. Перевіряйте чистоту фільтрів охолодження шаф [15].

**Висновки.** Практична значущість запропонованого методологічного підходу до діагностування суднового електротехнічного устаткування була підтверджена шляхом аналізу судових систем, а саме: аварійного дизель-генератора (АДГ), головного автоматичного вимикача (АВ) та системи автоматичної пожежної сигналізації (АПС).

У межах дослідження проведено чітке розмежування та дескриптивний аналіз категорій «небезпечний стан» та «граничний стан», які за певних експлуатаційних умов можуть розглядатися як синонімічні. Авторами детально вивчено етіологію виникнення граничних станів, що призводять до незворотної втрати працездатності виробу та його подальшого виведення з експлуатації.

Особливу увагу приділено ідентифікації критичних параметрів, значення яких сигналізують про наближення до межі функціональної придатності. У роботі експериментально доведено, що в умовах реальної експлуатації граничні значення цих параметрів не є статичними величинами: вони піддаються динамічним змінам під впливом зовнішніх та внутрішніх деструктивних чинників.

На основі отриманих даних розроблено математичну модель формування поступових відмов. Ця модель інтегрує в собі різноманітні негативні впливи, що діють на обладнання в процесі роботи, та наочно демонструє, як рівень безпеки функціонування об'єкта прогресивно знижується внаслідок фізичного зносу та природного старіння матеріалів. Встановлено, що постійний дрейф граничних значень параметрів є прямим наслідком цих деградаційних процесів.

Завершальним етапом дослідження став комплекс науково обґрунтованих рекомендацій. Вони спрямовані на стабілізацію робочих характеристик АДГ, АВ та АПС, а також на розробку превентивних заходів, що дозволяють мінімізувати ризики передчасного зносу та забезпечити високий рівень живучості судових електроенергетичних систем у довгостроковій перспективі.

#### Список літератури:

1. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти. Лондон.: ИМО. «Albert Embankment», 2017. 378 с.
2. Mukund R. Patel Shipboard electrical power systems. Taylor & Francis Group LLC, 2012. 337 p.
3. Цацко В.І., Яровенко В.О., Криворучко Д.Ю. Організація технічної експлуатації електричного обладнання і автоматики суден. Навчальний посібник. 2023.10.47049/ONMU-2023-NP13.
4. Криворучко Д.Ю., Цацко В.І. Технічна експлуатація електричного та електронного обладнання. Частина 1. Навчальний посібник. Одеса : ОНМУ, 2021. 251 с. DOI: <https://doi.org/10.47049/ONMU-2021-NP5>
5. Kalafatelis A. S. et al. Towards Predictive Maintenance in the Maritime Industry: A Component-Based Overview. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, № 3. P. 425. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse13030425>
6. Cicek K. Marine engineering systems failure analysis using extended failure modes and effects analysis with quality function deployment: maritime house of reliability. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2025. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1108/ijqrm-05-2025-0157>
7. Kiamah Philip. Electrical equipment handbook: troubleshooting and maintenance, McGraw-Hill Professional; ISBN: 978-0071396035.
8. Srinivaas A., Sakthivel N. R., Nair B. B. Machine Learning Approaches for Fault Detection in Internal Combustion Engines: A Review and Experimental Investigation. *Informatics*. 2025. Vol. 12, № 1. P. 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/informatics12010025>

9. Daya A. A., Lazakis I. Component Criticality Analysis for Improved Ship Machinery Reliability. *Machines*. 2023. Vol. 11, № 7. P. 737. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11070737>
10. Li L. et al. Early Detection of Health Condition Degradation of Circuit Breaker Based on Electrical Quantity Monitoring. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 14. P. 5581. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145581>
11. Oscar S., Anvar V. The monitoring system of an actual technical condition for pumping units with frequency analysis. *Procedia Engineering*. 2017. vol. 176. p. 144–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.282>
12. Boriak K., Ihnatenko O. Експрес-метод прогнозування розвитку деградаційних процесів в корабельних механізмах з використанням поточної інформації з бортових приладів. Праці Одеського політехнічного університету. 2024. 2(70) (Груд 2024), 131–142. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.15>
13. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using markov chains. *Science-Based Technologies*. 2023. 59(3). 251–261. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946>
14. International Maritime Organization, *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), Chapter II-1, Regulation 31 – Machinery controls*. IMO Publishing, London, 2020.
15. International Maritime Organization, *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), Chapter II-1, Regulation 42 – Bilge pumping arrangements*. IMO Publishing, London, 2020.

### **Doshchenko H.G., Nahovskyi D.A. METHODOLOGY FOR PREDICTING THE STATE OF ELECTRICAL EQUIPMENT USING PARAMETRIC FAILURE INDICATORS**

*The article proposes a methodological approach to assessing the technical condition of shipboard electrical equipment based on the analysis of parametric failure dynamics. The relevance of this work stems from the necessary transition from scheduled maintenance to a condition-based maintenance (CBM) strategy, which enables the prevention of sudden equipment failures.*

*The process of gradual failure formation in technical systems is examined. A model is described for the probabilistic assessment of an initiating emergency event or condition caused by this phenomenon. The study clarifies the concepts of a "dangerous state" and its synonym (under certain conditions), the "limit state." Possible causes of reaching a limit state—which results in the complete removal of the equipment from service—are investigated. In particular, the study analyzes critical parameters that define the product's limit state.*

*It is established that during the operation of shipboard equipment, the limit value of a critical parameter may fluctuate. A model of gradual failure formation is presented, accounting for factors that negatively impact equipment operation. The authors note that the probability of safe operation decreases as the equipment wears and ages, causing the limit value to shift constantly.*

*The study is based on modeling the degradation processes of key characteristics in shipboard electrical systems. The authors have identified key diagnostic indicators that signal the onset of parametric changes prior to functional failure or emergency shutdown.*

*The results of this work improve the accuracy of residual life prediction for electrical equipment and optimize maintenance schedules. The proposed methodology can be implemented within the energy sector and in automated monitoring systems for industrial facilities.*

**Keywords:** *electrical equipment, technical condition, parametric failure, diagnostics, residual resource, probability, insulation aging.*

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026



УДК 656.13:658.7:004.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/43>

**Іванченко Д.А.**

<https://orcid.org/0000-0002-3024-3930>

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Турпак С.М.**

<https://orcid.org/0000-0003-3200-8448>

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Острогляд О.О.**

<https://orcid.org/0000-0002-8496-3271>

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Мішнєв А.С.**

<https://orcid.org/0000-0007-7687-2367>

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Скляренко Ю.О.**

<https://orcid.org/0000-0007-8467-6754>

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

## СТРАТЕГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ШВИДКОПСУВНИХ ВАНТАЖІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПЕРІОД ВОЄННИХ ВИКЛИКІВ

*У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему оптимізації автомобільних перевезень швидкопсувних вантажів в умовах воєнних викликів, що характеризуються високим рівнем невизначеності, нестабільністю транспортної інфраструктури, безпековими загрозами та жорсткими часово-температурними обмеженнями доставки. Обґрунтовано, що традиційні логістичні підходи та статичні моделі планування маршрутів не забезпечують необхідного рівня адаптивності й надійності в умовах активних бойових дій, руйнування дорожньої мережі, запровадження комендантської години, перебоїв зв'язку та впливу засобів радіоелектронної боротьби.*

*Метою дослідження є розроблення стратегії оптимізації автомобільних перевезень швидкопсувних вантажів на основі інтеграції інтелектуальних технологій, що дозволяє одночасно забезпечити збереження якості продукції, мінімізацію логістичних ризиків і підвищення безпеки персоналу в умовах воєнного стану. Для досягнення поставленої мети використано системний підхід, методи аналізу та узагальнення наукових публікацій, концепції інтелектуальних транспортних систем, елементи теорії оптимізації, а також принципи сценарного моделювання кризових ситуацій.*

*У роботі запропоновано комплексну стратегію, що базується на принципах динамічності, автономності та інтеграції даних. Розроблено концептуальну архітектуру інтелектуальної логістичної системи, яка поєднує алгоритми штучного інтелекту для динамічної маршрутизації з урахуванням безпекових ризиків, IoT-моніторинг холодового ланцюга, гібридні навігаційні рішення в умовах втрати GPS-сигналу, а також елементи цифрових двійників і захищеного обміну даними. Запропоновано алгоритм реагування на типові кризові сценарії (повітряна тривога, втрата зв'язку, поломка рефрижераторного обладнання), що дозволяє підтримувати прийняття оперативних рішень у реальному часі.*

*Наукова новизна роботи полягає у формуванні інтегрованої стратегії оптимізації перевезень швидкопсувних вантажів з пріоритезацією безпекових факторів над класичними критеріями мінімізації часу та витрат, а також у поєднанні інтелектуальних алгоритмів з офлайн-механізмами функціону-*



вання логістичних систем. Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості їх використання транспортними та логістичними операторами для зниження втрат продукції, підвищення стійкості холодових ланцюгів постачання та забезпечення безпеки перевезень у надзвичайних умовах. Запропоновані підходи можуть бути адаптовані як для комерційних, так і для гуманітарних перевезень у кризових регіонах.

**Ключові слова:** транспорт, автомобільний транспорт, інтелектуальна логістична технологія оперативного управління перевезеннями, оперативне планування перевезень.

**Постановка проблеми.** Проблема науково-прикладного дослідження полягає у загостренні протиріччя між необхідністю суворого дотримання часових та температурних режимів доставки швидкопсувних вантажів та критичною нестабільністю транспортної системи в умовах війни. Традиційні методи логістичного управління, що базуються на статичних моделях та історичних даних, виявляються неефективними в умовах постійних змін безпекової ситуації, руйнування доріг та непередбачуваних затримок на блокпостах. Існуючі системи маршрутизації часто не враховують специфічні "воєнні" змінні, такі як зони артилерійських обстрілів, мінна небезпека або раптові зміни комендантської години. Це призводить до збільшення часу транспортування, псування продукції, зростання фінансових збитків та загрози життю персоналу. Відсутність інтегрованого підходу до використання інтелектуальних технологій не дозволяє логістичним операторам оперативно реагувати на ці виклики. Окремою проблемою є розрізненість інформаційних потоків, коли дані про стан доріг, черги та військові загрози не обробляються в єдиній системі прийняття рішень. Також спостерігається недостатня адаптивність алгоритмів до критеріїв виживання вантажу, де пріоритет безпеки може конфліктувати з вимогою швидкості. Водночас зростають вимоги до прозорості ланцюгів постачання гуманітарних та продовольчих вантажів. Необхідно вирішити задачу створення механізму, який дозволить балансувати між мінімізацією ризиків та максимізацією ефективності доставки в режимі реального часу. Відтак, виникає потреба у розробці науково обґрунтованої стратегії, що базується на синергії логістичних знань та сучасних ІТ-рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У статті [1] розглядається класична задача маршрутизації для швидкопсувних вантажів, де автор акцентує на впливі часу доставки на якість продукції. Запропонована модель враховує специфічні обмеження температури та часу, що підвищує її прикладну цінність. Автор демонструє, що стандартні алгоритми VRP не забезпечують належної ефективності для таких вантажів. Про-

ведено аналіз різних стратегій оптимізації, включаючи евристичні підходи.

У роботі [2] запропоновано інноваційний підхід до оптимізації ланцюгів постачання швидкопсувних товарів, заснований на цифрових двійниках. Модель забезпечує реальний час моніторингу та адаптації до змін у попиті й умовах транспортування. Автори наголошують на важливості стійкості систем у непередбачуваних умовах. Цифровий двійник дозволяє прогнозувати деградацію продукції та оптимізувати маршрути в режимі онлайн.

У дослідженні [3] представлено бі-цільову модель маршрутизації, яка поєднує мінімізацію логістичних витрат і підвищення задоволеності клієнтів. Автори враховують багатоперіодичність процесу доставки, що робить модель ближчою до реальних умов. Вони використовують просунуті методи оптимізації для балансування суперечливих критеріїв. Модель демонструє переваги у підвищенні ефективності планування. Результати показують, що клієнт-орієнтована логістика має істотний вплив на конкурентоспроможність підприємств.

Дослідження [4] присвячене задачі маршрутизації на перевантажених транспортних мережах із урахуванням деградації швидкопсувних продуктів. Автори аналізують відмінності між альтернативними маршрутами залежно від ступеня заторів. Модель дозволяє адаптивно обирати найкращий шлях у динамічних дорожніх умовах. Це значно знижує ризики втрати якості продукції.

У статті [5] проаналізовано динамічні навантаження на напіввагон під час його фіксації в'язким зв'язком на палубі порома. Автори створили математичну модель взаємодії вагона й палуби під час хитами судна. Дослідження виявило критичні режими роботи, що спричиняють пікові навантаження. Запропоновані рекомендації дозволяють підвищити безпеку перевезень.

Стаття [6] присвячена оцінці міцності несивої конструкції напіввагона з круглих труб під час перевезень поромом. Автори використовують чисельне моделювання для визначення напружено-деформованого стану конструкції. Аналіз показав потенційні зони ризику та можливі місця

втомних пошкоджень. Дослідження має прикладне значення для підвищення надійності рухомого складу.

Автори статті [7] запропонували екологічно орієнтовану модель маршрутів для швидкопсувних товарів із врахуванням трафіку. Автори розглядають стійкість і надійність постачань у складних дорожніх умовах. Оптимізаційний підхід поєднує мінімізацію викидів CO<sub>2</sub> та скорочення часу доставки. Результати підкреслюють роль зелених логістичних рішень у сучасних ланцюгах постачання. Дослідження демонструє, що екологічні та економічні цілі можуть бути збалансовані.

У статті [8] описано впровадження сталих моделей постачання з метою забезпечення якості та безпеки харчових продуктів. Автори аналізують польові експерименти, що підкреслюють важливість інтеграції сталих практик. Модель підвищує контроль за швидкопсувними товарами у складних умовах. Значну увагу приділено оцінці ризиків та їх мінімізації.

Дослідники [9] досліджують рішення щодо повторної маршрутизації транспортних засобів, що перевозять швидкопсувні вантажі. Автори підкреслюють важливість оперативного реагування на зміни дорожніх ситуацій. Використано алгоритмічні підходи для швидкого пошуку нових маршрутів. Дослідження показує, що навіть невеликі затримки сильно впливають на збереження товарів, і дозволяють знизити втрати.

В дослідженні [10] аналізують перспективи розвитку відновлюваної енергетики в морській галузі. Автори досліджують технологічні та екологічні аспекти інтеграції ВДЕ у морські перевезення. Розглянуто можливості підвищення енергоефективності суден. Модель показує, що стійкі енергетичні рішення знижують вплив на довкілля.

У статті [11] розглянуто параметри бортових ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Автори аналізують як теоретичні, так і практичні аспекти роботи систем. Було визначено критерії оптимального вибору ємності. Дослідження показало значні можливості підвищення енергоефективності транспорту.

Науковці [12] розробили багатоперіодичну модель маршрутизації для екстрених поставок швидкопсувних матеріалів. Запропоновано покращений алгоритм оптимізації на основі модифікованого whale optimization. Модель дозволяє враховувати невизначеність попиту. Результати демонструють високу ефективність при реагуванні на надзвичайні ситуації. Автори підкреслю-

ють важливість швидкого обчислення оптимальних маршрутів.

У роботі [13] представлено нечітку мультиоб'єктивну модель маршрутизації та розкладання доставки у зонах лиха. Використано гібридний метод оптимізації на базі мурашиних алгоритмів. Модель враховує багатоперіодичність і кілька критеріїв. Автори демонструють ефективність підходу у складних умовах невизначеності. Результати корисні для планування гуманітарних операцій.

Автор [14] аналізує стійкість холодних ланцюгів постачання для швидкопсувної продукції. Автор розглядає екологічні, технологічні та управлінські аспекти. Значну увагу приділено впливу порушень температурного режиму. Запропоновані шляхи підвищення стійкості логістичних систем.

В роботі [15] досліджують гібридну систему передавання даних для безпілотних надводних апаратів. Автори аналізують роботу системи в умовах перешкод та завад. Запропонована архітектура забезпечує високу надійність комунікації. Дослідження доводить її ефективність шляхом моделювання та експериментів.

Аналіз фахової літератури та останніх публікацій засвідчив, що питанням визначення стратегії оптимізації автомобільних перевезень швидкопсувних вантажів за допомогою інтелектуальних технологій у період воєнних викликів не приділено достатньої уваги. Більшість існуючих досліджень фокусуються або на загальних аспектах військової логістики, або на технологіях "розумного транспорту" в стабільних мирних умовах. Окремі праці розглядають проблему холодних ланцюгів, проте ігнорують специфічні ризики, пов'язані з активними бойовими діями та руйнуванням інфраструктури. Відсутні комплексні методики, які б інтегрували алгоритми штучного інтелекту для динамічної корекції маршрутів з урахуванням фактору фізичної безпеки водіїв та вантажу.

**Постановка завдання.** Метою науково-прикладного дослідження є розробка та обґрунтування стратегії оптимізації автомобільних перевезень швидкопсувних вантажів, що базується на інтеграції інтелектуальних технологій та адаптивних алгоритмів управління. Це дозволить забезпечити збереження якості продукції, мінімізувати ризики втрат та підвищити безпеку транспортних процесів в умовах невизначеності воєнного стану. Досягнення мети передбачає створення інструментарію для прийняття динамічних логістичних рішень з урахуванням безпекових, часових та економічних факторів.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована стратегія: базується на трьох принципах: динамічність (миттєва реакція на зміни), автономність (здатність працювати без зв'язку) та інтеграція даних (об'єднання військових та цивільних даних).

1. Аналіз ключових викликів воєнного часу. Перед впровадженням технологій необхідно розуміти специфічні бар'єри: фізичні перешкоди: зруйновані мости, блокпости, заміновані узбіччя; часові обмеження: комендантська година (вантажівка має зупинитися), повітряні тривоги; технологічні загрози: РЕБ (радіоелектронна боротьба), що глушить GPS-сигнал, перебої з мобільним зв'язком; ризики псування: затримка на кордоні або блокпості може призвести до розморожуван.

2. Технологічні рішення. Для вирішення цих проблем пропонується впровадження наступних модулів:

А. Динамічна маршрутизація з урахуванням ризиків. Штучний інтелект (AI) повинен розраховувати маршрут не за найкоротшою відстанню, а за "коефіцієнтом безпеки". Функціонал: інтеграція карт бойових дій (з відкритих джерел або API ДСНС/військових адміністрацій) у TMS (Transport Management System). Дія: система автоматично перебудовує маршрут, оминаючи зони високого ризику артилерійських обстрілів. Врахування комендантської години: алгоритм планує маршрут так, щоб водій гарантовано дістався безпечної стоянки (TIR parking) за 1 годину до початку комендантської години.

Б. IoT-моніторинг холодового ланцюга. Перевезення швидкопсувних вантажів вимагає суворого температурного режиму. Проблема: якщо водій змушений вимкнути двигун/рефрижератор через економію палива в черзі або поломку, вантаж зіпсується. Рішення: бездротові датчики температури та вологості, які працюють незалежно від живлення авто. Реагування: якщо температура виходить за межі норми, диспетчер отримує мит-

тєве сповіщення. Якщо GSM-зв'язку немає, дані кешуються і відправляються "пакетом" при появі мережі (або через супутниковий канал).

В. Навігація в умовах РЕБ. В зонах, де працює РЕБ, GPS може показувати хибні координати ("спуфінг") або зникати. Технологія: використання інерціальних навігаційних систем (які працюють без супутників певний час) або гібридних систем, що корегують позицію за вишками стільникового зв'язку (Cell ID) та Wi-Fi точками.

Г. Цифрові двійники та блокчейн для митниці. Швидке проходження кордону критичне для швидкопсувних товарів. Технологія: використання смарт-контрактів та електронних черг (єЧерга).

Попереднє декларування вантажу через захищені канали дозволяє мінімізувати час простою на митниці. ная рефрижератора, якщо закінчиться паливо.

3. Алгоритм дій при кризових ситуаціях.

Нижче у табличному (таблиця 1) вигляді наведено розроблену інтелектуальну систему сценаріїв реагування.

4. Організаційні та технічні вимоги до впровадження.

1. Гібридний зв'язок: обладнання вантажівок терміналами супутникового інтернету (наприклад, Starlink) для резервного каналу зв'язку в критичних точках.

2. Енергонезалежність: встановлення додаткових дизель-генераторів для рефрижераторних установок, щоб підтримувати температуру навіть при вимкненому тягачі.

3. Кібербезпека: шифрування даних про маршрути (оскільки це чутлива інформація під час війни). Використання закритих VPN-тунелів для передачі даних телеметрії.

4. Очікуваний ефект. Зниження псування вантажу: на 15–20% завдяки проактивному моніторингу температури. Безпека персоналу: зменшення ризику потрапляння під обстріли завдяки AI-аналізу небезпечних зон. Економія палива:

Таблиця 1

## Інтелектуальна система сценаріїв реагування

| Ситуація              | Дія системи (автоматизація)                                                                              | Дія людини (водій/диспетчер)                                      |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Повітряна тривога     | Система позначає найближчі укриття на карті водія. Зупиняє таймер SLA (Service Level Agreement) доставки | Водій прямує до укриття, блокує кабінку та вантажний відсік       |
| Втрата зв'язку        | Активується офлайн-режим додатку. Дані з датчиків пишуться в локальну пам'ять ("Чорна скринька")         | Водій використовує паперові накладні або завантажені офлайн-карти |
| Поломка рефрижератора | Система шукає найближчий склад-холодильник партнерів або вільну машину поруч.                            | Диспетчер організовує перевантаження товару                       |

оптимізація черг та уникнення "тупикових" маршрутів через зруйновану інфраструктуру.

**Висновки.** Отримані результати підтверджують гіпотезу про те, що інтеграція інтелектуальних технологій суттєво підвищує адаптивність логістичних систем в умовах війни.

Дискусійним залишається питання вартості впровадження запропонованих технологій для малого бізнесу, проте розрахунки свідчать про швидку окупність за рахунок зменшення втрат вантажу. Важливим результатом є доведення необхідності пріоритезації безпекових факторів

над часовими у певних сценарних умовах. Дослідження також виявило залежність між якістю інтернет-покриття та ефективністю роботи алгоритмів, що вимагає розробки офлайн-протоколів.

Підтверджено, що людський фактор залишається критичним, тому система має працювати в режимі підтримки прийняття рішень, а не повної автоматизації. Отримані дані корелюють з міжнародним досвідом кризової логістики, але мають специфіку, зумовлену характером бойових дій в Україні.

#### Список літератури:

1. Utama D. M. The vehicle routing problem for perishable goods. *Cogent Engineering*, 2020. 7, Article 1816148. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1816148>
2. Wu Y., Zhang J., Li Q., Tan H. Research on real-time robust optimization of perishable supply-chain systems based on digital twins. *Sensors*, 2023. 23(4), 1850. <https://doi.org/10.3390/s23041850>
3. Liang X., Wang N., Zhang M., Jiang B. Bi-objective multi-period vehicle routing for perishable goods delivery considering customer satisfaction. *Expert Systems with Applications*, 2023. 220, 119712. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119712>
4. Zhao F., Si B., Wei Z., Lu T. Time-dependent vehicle routing problem of perishable product delivery considering the differences among paths on the congested road. *Operational Research*, 2023. 23(1), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s12351-023-00751-3>
5. Fomin O., Lovska A., Kulbovskiy I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2(7). С. 6–12. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2019\\_2\(7\)\\_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
6. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 2019. Vol. 21, № 1. 28–34 URL: <https://dSPACE.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
7. Tirkolaee E. B. A robust green traffic-based routing problem for perishable products. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1111/coin.12240>
8. Abbas H., Zhao L., Gong X., Faiz N. The perishable products case to achieve sustainable food quality and safety goals: implementing on-field sustainable supply chain model. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. 101562. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101562>
9. Ghazal M. Transportation of perishable goods & rerouting solutions. *Proceedings ACM*. 2022. <https://doi.org/10.1145/3524338.3524370>
10. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjstst.2025.127.10>
11. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
12. Li X., Xu Y., Lai K. K., Ji H., Xu Y., Li J. A multi-period vehicle routing problem for emergency perishable materials under uncertain demand based on an improved whale optimization algorithm. *Mathematics*. 2022. 10(17), 3124. <https://doi.org/10.3390/math10173124>
13. Niksirat M., Saffarian M., Tayyebi J., Deaconu A. M., Spridon D. E. Fuzzy multi-objective, multi-period integrated routing–scheduling to distribute relief to disaster areas: a hybrid ant colony optimization approach. *Mathematics*. 2024. 12(18), 2844. <https://doi.org/10.3390/math12182844>
14. Zhang B. Sustainability of perishable food cold chain logistics. *Sage Open*. 2024. <https://doi.org/10.1177/21582440241280455>
15. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 2025. 9(3), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>

Ivanchenko D.A., Turpak S.M., Ostrohliad O.O., Mishniev A.S., Sklyarenko Yu.O.

## STRATEGY FOR OPTIMIZING ROAD TRANSPORTATION OF PERISHABLE GOODS USING INTELLIGENT TECHNOLOGIES DURING MILITARY CHALLENGES

*The article addresses a relevant scientific and applied problem of optimizing road transportation of perishable goods under military challenges, which are characterized by a high level of uncertainty, instability of transport infrastructure, security threats, and strict time-temperature constraints. It is substantiated that traditional logistics approaches and static route-planning models are unable to provide the required level of adaptability and reliability in conditions of active hostilities, destruction of road networks, curfews, communication disruptions, and the impact of electronic warfare. As a result, transportation time increases, product quality deteriorates, economic losses grow, and risks to personnel safety intensify, which necessitates the development of fundamentally new intelligent logistics solutions.*

*The purpose of the study is to develop and substantiate a strategy for optimizing road transportation of perishable goods based on the integration of intelligent technologies, ensuring product quality preservation, risk minimization, and enhanced safety of transport processes during wartime. To achieve this goal, a systems approach was applied, combining methods of analysis and synthesis of scientific publications, concepts of intelligent transportation systems, optimization theory elements, and scenario-based modeling of crisis situations.*

*The paper proposes a comprehensive optimization strategy based on the principles of dynamism, autonomy, and data integration. A conceptual architecture of an intelligent logistics system is developed, integrating artificial intelligence algorithms for dynamic route planning with security risk assessment, IoT-based monitoring of cold chain parameters, hybrid navigation solutions under GPS degradation or loss, and the use of digital twins and secure data exchange mechanisms. Special attention is paid to ensuring the system's operability in offline or limited-connectivity modes, which is critical in areas affected by military operations.*

*An algorithm for responding to typical crisis scenarios—such as air raid alerts, communication loss, and refrigeration unit failures—is proposed, enabling effective decision support in real time. The scientific novelty of the study lies in the formation of an integrated optimization strategy that prioritizes safety and survivability criteria over traditional time- and cost-minimization objectives, as well as in the combination of intelligent algorithms with autonomous operational protocols.*

*The practical significance of the results consists in the possibility of their application by transport and logistics operators to reduce losses of perishable goods, increase the resilience of cold supply chains, and enhance personnel safety under extreme conditions. The proposed approaches can be adapted for both commercial and humanitarian transportation in crisis and conflict-affected regions.*

**Keywords:** transport, road transport, intelligent logistics technology for operational transportation management, operational transportation planning.

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Кисельов В.Б.**

<https://orcid.org/0000-0003-3437-2825>

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

**Назарова А.П.**

<https://orcid.org/0000-0001-7099-2023>

Національний транспортний університет

## ПОБУДОВА РАЦІОНАЛЬНИХ МАРШРУТІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НЕГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ МЕРЕЖЕЮ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ ДЕРЖАВНОГО ЗНАЧЕННЯ

У статті розглядається методика та результати експериментальних досліджень щодо побудови раціональних маршрутів руху великовагових та/або великогабаритних транспортних засобів на мережі автомобільних доріг загального користування державного значення на основі розрахунку найкоротших відстаней у разі великої кількості проміжних пунктів. Великовагові та/або великогабаритні вантажі, які перевозяться автомобільним транспортом, є негабаритними вантажами. Габарити вантажів, що перевозяться по дорогах загального користування в Україні, повинні відповідати суворим стандартам і нормам. Зокрема, згідно з діючими правилами дорожнього руху, транспортування негабаритного вантажу може виконуватися в спеціально підготовленому транспорті, габарити якого не повинні перевищувати 2 м 60 см в ширину, 18,75 м в довжину і 4 м в висоту, рахуючи від дорожнього покриття, загальна вага тягача з вантажем – до 40 тонн. Якщо хоч один параметр перевищує встановлені межі, перевезення вважається негабаритним або великоваговим. Тоді потрібно оформити спеціальний дозвіл на рух, який видає Укравтодор або Нацполіція.

Було розроблено програмно-інструментальний комплекс «Інформаційна система вантажних перевезень на транспортних системах України та Західної Європи» у середовищі об'єктно-орієнтованої мови програмування Delphi з використанням у якості бази даних реляційного типу Access. Експериментальна перевірка роботи цього комплексу відбувалась на реальних даних. Було розраховано 10 міжнародних та 10 внутрішніх маршрутів руху великовагових та/або великогабаритних транспортних засобів на мережі автомобільних доріг загального користування державного значення транспортних систем України та Західної Європи на основі розрахунку найкоротших відстаней у разі великої кількості проміжних пунктів. Розраховувались ток експлуатаційні показники маршрутів вантажних перевезень: вартість виконання рейсу, час виконання рейсу, відстань та середня швидкість. Розроблена база даних 3Є включає 812 транспортних вузлів та 906 транспортних ділянок транспортних систем України та Західної Європи.

Для розв'язання поставленої задачі дослідження, а саме знаходження найкоротшої відстані на дорожньо-транспортній мережі, був використаний алгоритм Дейкстри.

**Ключові слова:** вантажні перевезення, негабаритний вантаж, найкоротший шлях, дорожньо-транспортна мережа, оптимізація, міжнародне сполучення.

**Постановка проблеми.** Воєнний стан в Україні створив суттєві виклики для функціонування транспортної галузі України, що зумовило необхідність активізації перевезень різних вантажів, зокрема негабаритних вантажів воєнного призначення. В умовах війни порушення логістичних ланцюгів, закриття портів, руйнування інфраструктури та підвищення ризиків транспортних

перевезень спричинили потребу в нових рішеннях на міжнародному рівні. Співпраця з європейськими та світовими партнерами є ключовою для забезпечення стабільності та ефективності спільного функціонування транспортних систем України та Західної Європи, зокрема у побудові раціональних маршрутів перевезення негабаритних вантажів мережею автомобільних доріг



загального користування державного значення. Проблематика дослідження пов'язана із визначенням ролі транспортної діяльності в економічному відродженні України та розробкою рекомендацій щодо її оптимізації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Протягом останніх п'яти років багато наукових публікацій висвітлювали питання транспортно-експедиторської діяльності в кризових умовах. У публікації Цюня О.П. та Плекана У.М. "Транспортно-експедиторська діяльність в Україні. Перспективи відбудови" [1] підкреслюється значущість транспортної інфраструктури для економіки країни та наголошується на необхідності її відновлення для забезпечення ефективної роботи транспортної галузі.

У дослідженні Раса Субачієне, Крутової А.С. та Нестеренко О.О. "Детермінанти сталого розвитку в умовах післявоєнного відновлення України" [2] авторами були розроблені організаційно-методичні питання моніторингу внеску корпоративного сектору в досягнення цілей сталого розвитку на етапі післявоєнного відновлення України. В роботі використовуються методи аналізу і синтезу (для дослідження наслідків військової агресії Росії для економічного розвитку України та досягнення цілей сталого розвитку), порівняння (при аналізі вимог міжнародних нормативних актів до структури, етапів формування, набору показників звітності).

У статті авторів Ланового О.Т., Кисельова В.Б., Кошарного О.М. "Аналіз і бізнес-планування функціонування автомобільної дороги «Київ – Одеса» на платній та безоплатній основі" [3] розглянуті дослідження можливості введення плати за проїзд після реконструкції автомобільної дороги Київ – Одеса. Методом дослідження є методика визначення капітальних (інвестиційних), поточних та адміністративних витрат при розрахунку максимального розміру плати за проїзд автомобільною дорогою.

Авторами Прокудін Г.С., Прокудін О.Г., Назарова А.П. у статті "Система аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів" [4] запропоновано модель аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів, яка представлена у вигляді мережі систем масового обслуговування. Ця мережа імітує технологічні процеси доставки вантажів від вантажовідправника до вантажоотримувача і передбачає адекватне реагування на виникаючі в процесі її функціонування ситуації та дозволяє корегувати значення тих чи інших параметрів та характеристик мережі (кількість каналів, інтенсивність обслуговування і таке інше) з метою забезпечення

оптимального процесу обслуговування вимог на доставку вантажів у міжнародному сполученні.

Незважаючи на наявність досліджень у напрямку підвищення ефективності транспортного процесу перевезень вантажів, недостатньо уваги приділено питанням перевезень таких специфічних вантажів, як негабаритні. Зокрема це стосується побудови раціональних маршрутів руху великовагових та/або великогабаритних транспортних засобів мережею автомобільних доріг загального користування державного значення за критерієм найкоротшої відстані.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка науково-обґрунтованих пропозицій щодо побудови раціональних маршрутів руху великовагових та/або великогабаритних транспортних засобів на мережі автомобільних доріг загального користування державного значення.

**Виклад основного матеріалу.** В ході досліджень було розроблено програмно-інструментальний комплекс (ПІК) «Інформаційна система вантажних перевезень на транспортних системах України та Західної Європи – ІСВПнаТСУтаЗЄ» середовищі об'єктно-орієнтованої мови програмування Delphi (Borland Delphi 7) з використанням у якості бази даних реляційного типу Access (версія Microsoft Access 2016) [5].

Експериментальна перевірка роботи ПІК ІСВПнаТСУтаЗЄ відбувалась на реальних даних. Було розраховано 10 раціональних міжнародних і 10 внутрішніх маршрутів руху великовагових та/або великогабаритних транспортних засобів на мережі автомобільних доріг загального користування державного значення транспортних систем України та Західної Європи на основі розрахунку найкоротших відстаней у разі великої кількості проміжних пунктів. Розраховувались такі експлуатаційні показники маршрутів вантажних перевезень: вартість виконання рейсу (грн), час виконання рейсу (год), відстань (км) та середня швидкість (км/год) (табл. 1).

База даних ПІК ІСВПнаТСУтаЗЄ включає 812 транспортних вузлів (рис. 1) та 906 транспортних ділянок (рис. 2) транспортних систем України та Західної Європи. Умовою побудови такої об'єднаної транспортної системи є наступна – кожний транспортний вузол має хоча одну транспортну ділянку, яка приєднає його до транспортної системи.

Також були розраховані експлуатаційні показники всіх ділянок вищенаведених маршрутів вантажних перевезень: відстань (км), час виконання (год), та швидкість (км/год) (у табл. 2 наведено маршрут № 13).

**Результати експериментальних розрахунків експлуатаційних показників  
10 міжнародних і 10 внутрішніх маршрутів**

| Маршрути | Пункт відправлення | Пункт призначення | Пункт пропуску (для міжнародних рейсів) | Вартість виконання рейсу (грн) | Час виконання рейсу (год) | Відстань (км) | Середня швидкість (км/год) |
|----------|--------------------|-------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------|----------------------------|
| № 1      | Київ               | Варшава           | Ягодин                                  | 118540.76                      | 15.68                     | 784           | 49.90                      |
| № 2      | Чернігів           | Кишинів           | Платанове                               | 127915.16                      | 16.92                     | 846           | 49.91                      |
| № 3      | Харків             | Кошице            | Ужгород                                 | 201549.56                      | 26.66                     | 1333          | 50.11                      |
| № 4      | Суми               | Будапешт          | Чоп                                     | 211679.96                      | 28.00                     | 1400          | 49.96                      |
| № 5      | Дніпро             | Брашов            | Сірет                                   | 196862.36                      | 26.04                     | 1302          | 50.15                      |
| № 6      | Одеса              | Гданськ           | Краківець                               | 232999.16                      | 30.82                     | 1541          | 49.94                      |
| № 7      | Рівно              | Сегед             | Чоп                                     | 146663.96                      | 19.40                     | 970           | 49.95                      |
| № 8      | Миколаїв           | Тираспіль         | Платанове                               | 79379.96                       | 10.50                     | 525           | 49.90                      |
| № 9      | Хмельницький       | Вроцлав           | Краківець                               | 122623.16                      | 16.22                     | 811           | 49.91                      |
| № 10     | Полтава            | Бухарест          | Сірет                                   | 210319.16                      | 27.82                     | 1391          | 50.14                      |
| № 11     | Кременчук          | Луцьк             | -                                       | 101001.56                      | 13.36                     | 668           | 50.11                      |
| № 12     | Кропивницький      | Мукачево          | -                                       | 125798.36                      | 16.64                     | 832           | 49.94                      |
| № 13     | Львів              | Житомир           | -                                       | 60933.56                       | 8.06                      | 403           | 49.88                      |
| № 14     | Чернівці           | Конотоп           | -                                       | 111131.96                      | 14.70                     | 735           | 50.03                      |
| № 15     | Івано-Франківськ   | Ніжин             | -                                       | 118087.16                      | 15.62                     | 781           | 49.97                      |
| № 16     | Ковель             | Бахмач            | -                                       | 102967.16                      | 13.62                     | 681           | 49.89                      |
| № 17     | Черкаси            | Червоноград       | -                                       | 126705.56                      | 16.76                     | 838           | 50.06                      |
| № 18     | Вінниця            | Запоріжжя         | -                                       | 112190.36                      | 14.84                     | 742           | 50.17                      |
| № 19     | Тернопіль          | Чернігів          | -                                       | 85881.56                       | 11.36                     | 568           | 50.09                      |
| № 20     | Бориспіль          | Ужгород           | -                                       | 119447.96                      | 15.80                     | 790           | 50.13                      |

| K <sub>i</sub> | Naim          | Kol <sub>g</sub> |
|----------------|---------------|------------------|
| 1              | Каховка       | 42600            |
| 2              | Северодонецьк | 130300           |
| 3              | Краматорськ   | 191300           |
| 4              | Ізмаїл        | 91500            |
| 5              | Болград       | 17600            |
| 6              | Кілія         | 25700            |
| ...            |               |                  |
| 807            | Яремча        | 9004             |
| 808            | Берегове      | 23325            |
| 809            | Косіне        | 5601             |
| 810            | Тираспіль     | 126306           |
| 811            | Берестин      | 18543            |
| 812            | Теофіполь     | 6284             |
| *              |               | 0                |

Рис. 1. Транспортні вузли БД

Вихідна форма роботи ПІК ІСВПнаТСУтаЗЄ по маршруту № 13 «Львів – Житомир» наведена на рисунку 3.

Покажімо на прикладі маршруту № 13 «Львів – Житомир», як знаходиться найкоротша відстань від транспортного вузла-джерела (ТВ) Львів до ТВ Житомир. На рисунку 4 наведено фрагмент карти України з шістьма ТВ маршруту № 13, а саме: Львів, Буск, Радивілов, Дубно, Рівно, Новоград-Волинський і Житомир та іншими шістьма ТВ, які об'єднані транспортними шляхами у дорожньо-транспортну мережу. Також на рисунку на транспортних шляхах вказані відстані між відповідними ТВ [6].

Таким чином ми маємо дорожньо-транспортну мережу (ДТМ) з дванадцятьма ТВ та сімнадцятьма транспортними шляхами, які отримані з БД ПІК ІСВПнаТСУтаЗЄ. Представимо для ДТМ матрицю суміжності С (табл. 3), у якій для ТВ, які мають транспортний зв'язок (шлях) проставляються відповідна відстань між ними, а якщо такого зв'язку на існує, то проставляється знак нескінченності ( $\infty$ ). Матриця симетрична відносно основної діагоналі, тому що на ділянках ДТМ відбувається двох сторонній рух транспортних засобів.

Для розв'язання поставленої задачі, а саме знаходження найкоротшої відстані на ДТМ будемо

• • •

**Рис. 2. Транспортні ділянки БД**

Таблиця 2

### Результати експериментальних розрахунків експлуатаційних показників по ділянках маршруту № 13 «Львів – Житомир»

| Назва ділянки маршруту        | Відстань (км) | Час виконання рейсу (год) | Швидкість (км/год) |
|-------------------------------|---------------|---------------------------|--------------------|
| Львів – Буск                  | 55.00         | 1.11                      | 49.54              |
| Буск – Радивілов              | 60.00         | 1.21                      | 49.58              |
| Радивілов – Дубно             | 56.00         | 1.13                      | 49.55              |
| Дубно – Рівно                 | 45.00         | 0.89                      | 50.56              |
| Рівно – Новоград-Волинський   | 102.00        | 2.05                      | 49.75              |
| Новоград-Волинський – Житомир | 85.00         | 1.69                      | 50.29              |
| Ітого                         | <b>403</b>    | <b>8.06</b>               | <b>49.88</b>       |

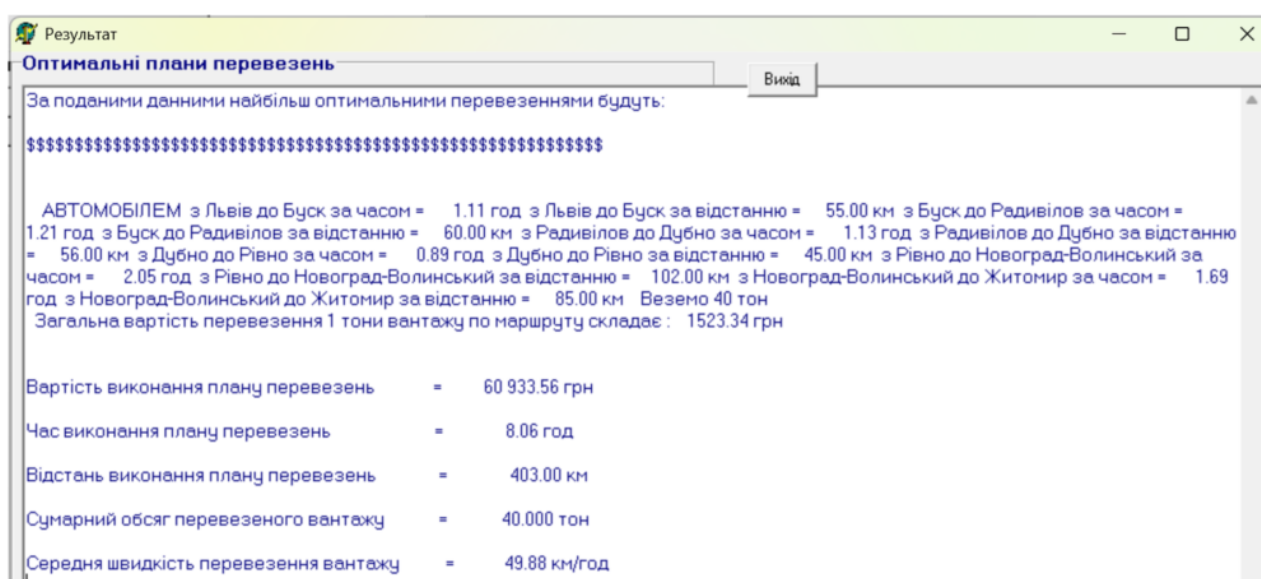


**Рис. 3. Вихідна форма роботи ПІК ІСВПнаТСУтаЗЄ по маршруту № 13**



Рис. 4. Фрагмент карти України з ТВ маршруту № 13

Таблиця 3

Таблиці суміжності С для фрагменту карти України з ТВ маршруту № 13 (див. рис. 4)

|    | ТВ                  | Львів | Буск | Радивілов | Дубно | Тернопіль | Рівно | Теофіполь | Шепетівка | Хмельницький | Новоград-Волинський | Бердичів | Житомир |
|----|---------------------|-------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-----------|--------------|---------------------|----------|---------|
| №  |                     | 1     | 2    | 3         | 4     | 5         | 6     | 7         | 8         | 9            | 10                  | 11       | 12      |
| 1  | Львів               | ∞     | 55   | ∞         | ∞     | 128       | ∞     | ∞         | ∞         | ∞            | ∞                   | ∞        | ∞       |
| 2  | Буск                | 55    | ∞    | 60        | ∞     | ∞         | ∞     | ∞         | ∞         | ∞            | ∞                   | ∞        | ∞       |
| 3  | Радивілов           | ∞     | 60   | ∞         | 56    | ∞         | ∞     | 123       | ∞         | ∞            | ∞                   | ∞        | ∞       |
| 4  | Дубно               | ∞     | ∞    | 56        | ∞     | ∞         | 45    | ∞         | 130       | ∞            | ∞                   | ∞        | ∞       |
| 5  | Тернопіль           | 128   | ∞    | ∞         | ∞     | ∞         | ∞     | 83        | ∞         | 112          | ∞                   | ∞        | ∞       |
| 6  | Рівно               | ∞     | ∞    | ∞         | 45    | ∞         | ∞     | ∞         | ∞         | ∞            | 102                 | ∞        | ∞       |
| 7  | Теофіполь           | ∞     | ∞    | 123       | ∞     | 83        | ∞     | ∞         | 88        | ∞            | ∞                   | 208      | ∞       |
| 8  | Шепетівка           | ∞     | ∞    | ∞         | 130   | ∞         | ∞     | 88        | ∞         | ∞            | 71                  | ∞        | 135     |
| 9  | Хмельницький        | ∞     | ∞    | ∞         | ∞     | 112       | ∞     | ∞         | ∞         | ∞            | ∞                   | 189      | ∞       |
| 10 | Новоград-Волинський | ∞     | ∞    | ∞         | ∞     | ∞         | 102   | ∞         | 71        | ∞            | ∞                   | ∞        | 85      |
| 11 | Бердичів            | ∞     | ∞    | ∞         | ∞     | ∞         | ∞     | 208       | ∞         | 189          | ∞                   | ∞        | 43      |
| 12 | Житомир             | ∞     | ∞    | ∞         | ∞     | ∞         | ∞     | ∞         | 135       | ∞            | 85                  | 43       | ∞       |

використовувати алгоритм Дейкстри [7], який закладено у програмне забезпечення ППК ІСВПнаТСУтаЗС. Цей алгоритм будує множину вершин  $S$ , для яких найкоротші шляхи від джерела (ТВ початку маршруту – у нашому випадку це Львів) уже відомі. На кожному кроці до множини  $S$  додається тій з ТВ, відстань до якого від джерела менша, ніж від інших ТВ, що залишилися. Оскільки відстані всіх транспортних шляхів позитивні, то можна стверджувати, що найкоротший шлях (маршрут) від джерела до ТВ кінця маршруту – у нашому випадку це Житомир, проходить тільки через вершини множини  $S$ . Назвемо такий

шлях особливим. На кожному кроці алгоритму (методу) використовується масив  $D$ , у який записуються довжини найкоротших особливих шляхів до кожного ТВ.

Коли множина  $S$  буде містити усі ТВ розглянутої ДТМ, тобто для усіх ТВ будуть знайдені особливі шляхи, тоді масив  $D$  буде містити довжини найкоротших шляхів від джерела до кожного ТВ. Також при розрахунках використовується масив  $P$ , у якому кожний елемент  $P[V]$  містить ТВ, що безпосередньо передувє ТВ  $V$  у найкоротшому шляху. Для нашого прикладу  $n = 12$  – кількість ТВ на ДТМ.

Для опрацювання алгоритму побудуємо наступну таблицю (табл. 4).

Починаємо опрацьовувати блок-схему алгоритму Дейкстри [8]. Спочатку до особливого шляху (множини)  $S$  додаємо ТВ-джерело з номером **1** (Львів), тому що маршрут починається з нього. Далі на початковому кроці для кожного ТВ, починаючи з **2** по **12** проставимо у дріб, чисельник якої дорівнює відстані до нього від ТВ-джерела **1** (це фактично перший рядок матриці суміжності  $C$ ), а знаменник дорівнює **1** – номеру ТВ, який передувє цьому ТВ у особливому (найкоротшому) шляху  $S$ . ТВ з номером  $W$  на цьому початковому кроці не визначений, тому проставимо у відповідній клітинці знак прочерку (–).

Далі переходимо до *першого* кроку алгоритму Дейкстри, тобто визначаємо ТВ, відстань до якого від ТВ-джерела **1** мінімальна. У нашому випадку це ТВ з номером **2** (Буск) – 55 км, тому додаємо його до множини  $S$ , а його номер (**2**) проставляємо у клітинку  $W$  (дивись нижченаведена таблиця розрахунків), причому у подальшому цей ТВ (**2**) не буде приймати участь у розрахунках найкорот-

шого шляху, тому ми його викреслюємо знаком “–” (табл. 5).

Для всіх інших ТВ (з **3** по **12**) розраховуємо значення найкоротшої відстані до них від ТВ-джерела (**1**) через ТВ з номером  $W$ , а саме **2** за наступною формулою:

$$D[V] = \min(D[V], D[W] + C[W, V]) \quad (1)$$

$$V=3: D[3] = \min(D[3], D[2] + C[2, 3]) = \min(\infty, 55 + 60) = 115;$$

$$V=4: D[4] = \min(D[4], D[2] + C[2, 4]) = \min(\infty, 55 + \infty) = \infty;$$

$$V=5: D[5] = \min(D[5], D[2] + C[2, 5]) = \min(128, 55 + \infty) = 128;$$

$$V=6: D[6] = \min(D[6], D[2] + C[2, 6]) = \min(\infty, 55 + \infty) = \infty;$$

$$V=7: D[7] = \min(D[7], D[2] + C[2, 7]) = \min(\infty, 55 + \infty) = \infty;$$

$$V=8: D[8] = \min(D[8], D[2] + C[2, 8]) = \min(\infty, 55 + \infty) = \infty;$$

$$V=9: D[9] = \min(D[9], D[2] + C[2, 9]) = \min(\infty, 55 + \infty) = \infty;$$

$$V=10: D[10] = \min(D[10], D[2] + C[2, 10]) = \min(\infty, 55 + \infty) = \infty;$$

$$V=11: D[11] = \min(D[11], D[2] + C[2, 11]) = \min(\infty, 55 + \infty) = \infty;$$

$$V=12: D[12] = \min(D[12], D[2] + C[2, 12]) = \min(\infty, 55 + \infty) = \infty.$$

Вносимо отримані значення у наступну таблицю, причому для ТВ **3** змінився номер ТВ, який передувє йому у найкоротшому шляху – це ТВ **2** (табл. 6).

Таблиця 4

| Крок       | S | W | D/P      |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|------------|---|---|----------|-----------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            |   |   | 2        | 3               | 4               | 5         | 6               | 7               | 8               | 9               | 10              | 11              | 12              |
| Початок    | 1 | – | 55/<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | 128/<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 |
| 1          |   |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 2          |   |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| ...        |   |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 11 (n – 1) |   |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |

Таблиця 5

| Крок       | S    | W | D/P      |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|------------|------|---|----------|-----------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            |      |   | 2        | 3               | 4               | 5         | 6               | 7               | 8               | 9               | 10              | 11              | 12              |
| Початок    | 1    | – | 55/<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | 128/<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 |
| 1          | 1, 2 | 2 | –        |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 2          |      |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| ...        |      |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 11 (n – 1) |      |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |

Таблиця 6

| Крок       | S    | W | D/P      |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|------------|------|---|----------|-----------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            |      |   | 2        | 3               | 4               | 5         | 6               | 7               | 8               | 9               | 10              | 11              | 12              |
| Початок    | 1    | – | 55/<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | 128/<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 |
| 1          | 1, 2 | 2 | –        | 115/<br>2       | $\infty$ /<br>1 | 128/<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 | $\infty$ /<br>1 |
| 2          |      |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| ...        |      |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 11 (n – 1) |      |   |          |                 |                 |           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |



Подальші розрахунки (з другого по одинадцятий кроки алгоритму Дейкстри) проведемо у табличному процесорі. Результатом цих розрахунків буде наступна таблиця (табл. 7).

Інтерпретуємо отримані результати. Для цього побудуємо найкоротший маршрут від його начального ТВ – Львів (①), до кінцевого ТВ – Житомир (⑫). Для цього скористаємося останньою таблицею розрахунків, яка була отримана за допомогою табличного процесора Ексел. Причому будемо рухатися в неї від до кінцевого ТВ – Житомир (⑫) назад до начального ТВ – Львів (①) і аналізувати дріб D/P, в чисельнику якої (D) знаходиться найкоротша відстань від ТВ-джерела (①) до поточного ТВ, а в знаменнику – номер ТВ, який передувє поточному ТВ у найкоротшому маршруті.

Аналізуємо результат, який проставлений у дванадцятому стовпчику, а саме **403/10**. Це означає, що найкоротша відстань до ТВ з номером ⑫ від ТВ-джерела **1** складає 403 км, а передувє йому (ТВ **12**) у найкоротшому маршруті ТВ з номером **10**. Фіксуємо це графічно наступним чином:

$$\dots \textcircled{10} \rightarrow \textcircled{12} = 403 \text{ км}$$

Далі аналізуємо результат, який проставлений у десятому стовпчику, а саме **318/6** і відображаємо його на нашому маршруті наступним чином:

$$403-318=85$$

$$\dots \textcircled{6} \rightarrow \textcircled{10} \rightarrow \textcircled{12} = 403 \text{ км}$$

Далі аналізуємо результат, який проставлений у шостому стовпчику, а саме **216/4** і відображаємо його на нашому маршруті наступним чином:

$$318-216=102 \quad 403-318=85$$

$$\dots \textcircled{4} \rightarrow \textcircled{6} \rightarrow \textcircled{10} \rightarrow \textcircled{12} = 403 \text{ км}$$

Далі аналізуємо результат, який проставлений у четвертому стовпчику, а саме **171/3** і відображаємо його на нашому маршруті наступним чином:

$$216-171=45 \quad 318-216=102 \quad 403-318=85$$

$$\dots \textcircled{3} \rightarrow \textcircled{4} \rightarrow \textcircled{6} \rightarrow \textcircled{10} \rightarrow \textcircled{12} = 403 \text{ км}$$

Далі аналізуємо результат, який проставлений у третьому стовпчику, а саме **115/2** і відображаємо його на нашому маршруті наступним чином:

$$171-115=56 \quad 216-171=45 \quad 318-216=102 \quad 403-318=85$$

$$\dots \textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3} \rightarrow \textcircled{4} \rightarrow \textcircled{6} \rightarrow \textcircled{10} \rightarrow \textcircled{12} = 403 \text{ км}$$

Далі аналізуємо результат, який проставлений у другому стовпчику, а саме **55/1** і відображаємо його на нашому маршруті наступним чином:

$$55 \quad 115-55=60 \quad 171-115=56 \quad 216-171=45 \quad 318-216=102 \quad 403-318=85$$

$$\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3} \rightarrow \textcircled{4} \rightarrow \textcircled{6} \rightarrow \textcircled{10} \rightarrow \textcircled{12} = 403 \text{ км}$$

Ми отримали маршрут, який співпадає з маршрутом, який був розрахований за допомогою ППК ІСВПнаТСУтаЗЄ (див. табл. 2).

**Висновки.** В Україні норми перевезення вантажів регулюють безпеку та збереження доріг: максимальна загальна маса автопоїзда – 40 тонн (для контейнеровозів до 44-46 тонн), навантаження на одинарну вісь – до 11 т, здвоєну – 16 т, строєну – 22 т. Габарити не повинні перевищувати 4 м у висоту, 2.6 м завширшки та 22 м завдовжки. Тому експериментальні розрахунки експлуатаційних показників 10 міжнародних і 10 внутрішніх маршрутів проводились з автопоїздами, вага яких дорівнювала 40 тонам.

Аналізуючи результати експериментальних розрахунків експлуатаційних показників 10 міжнародних і 10 внутрішніх маршрутів (табл. 1)

Таблиця 7

|    | A       | B | C | D | E | F | G | H | I | J  | K  | L  | M  | N  | O  | P   | Q   | R | S   | T | U   | V   | W   | X   | Y   | Z   | AA  | AI  | AC  | AE  | AF  | AG  | AI  | AJ |
|----|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|-----|-----|---|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 1  | Крок    | S |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | W  | D/P |     |   |     |   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 2  |         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |    |    |    |     |     |   |     |   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 3  | Початок | 1 |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | -  | 55 | 1   | 999 | 1 | 999 | 1 | 128 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1  |
| 4  | 1       | 1 | 2 |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | 2  | -  | -   | 115 | 2 | 999 | 1 | 128 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1  |
| 5  | 2       | 1 | 2 | 3 |   |   |   |   |   |    |    |    |    | 3  | -  | -   | -   | - | 171 | 3 | 128 | 1   | 999 | 1   | 238 | 3   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1   | 999 | 1  |
| 6  | 3       | 1 | 2 | 3 | 5 |   |   |   |   |    |    |    |    | 5  | -  | -   | -   | - | 171 | 3 | -   | -   | 999 | 1   | 211 | 5   | 999 | 1   | 240 | 5   | 999 | 1   | 999 | 1  |
| 7  | 4       | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 |   |   |   |    |    |    |    | 4  | -  | -   | -   | - | -   | - | -   | 216 | 4   | 211 | 5   | 301 | 4   | 240 | 5   | 999 | 1   | 999 | 1   |    |
| 8  | 5       | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 7 |   |   |    |    |    |    | 7  | -  | -   | -   | - | -   | - | -   | 216 | 4   | -   | -   | 299 | 7   | 240 | 5   | 999 | 1   | 419 | 7   |    |
| 9  | 6       | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 7 | 6 |   |    |    |    |    | 6  | -  | -   | -   | - | -   | - | -   | -   | -   | -   | -   | 299 | 7   | 240 | 5   | 318 | 6   | 419 | 7   |    |
| 10 | 7       | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 7 | 6 | 9 |    |    |    |    | 9  | -  | -   | -   | - | -   | - | -   | -   | -   | -   | -   | 299 | 7   | -   | -   | 318 | 6   | 419 | 7   |    |
| 11 | 8       | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 7 | 6 | 9 | 8  |    |    |    | 8  | -  | -   | -   | - | -   | - | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 318 | 6   | 419 | 7   |    |
| 12 | 9       | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 7 | 6 | 9 | 8  | 10 |    |    | 10 | -  | -   | -   | - | -   | - | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 419 | 7   | 403 |    |
| 13 | 10      | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 7 | 6 | 9 | 8  | 10 | 12 |    | 12 | -  | -   | -   | - | -   | - | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 419 | 7   | -   |    |
| 14 | 11      | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 7 | 6 | 9 | 8  | 10 | 12 | 11 | 11 | -  | -   | -   | - | -   | - | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |    |

можна зробити наступні висновки: вартість виконання рейсу змінювалася в інтервалі від **60933.56** грн (внутрішній рейс Львів – Житомир) до **232999.16** грн (міжнародний рейс Одеса – Гданськ); відстань рейсу змінювалася в інтервалі від **403** км (внутрішній рейс Львів – Житомир) до **1541** км (міжнародний рейс Одеса – Гданськ); час виконання рейсу змінювалася в інтервалі від **8.06** год (внутрішній рейс Львів – Житомир) до **30.821** год (міжнародний рейс Одеса – Гданськ); середня швидкість виконання рейсу змінювалася в інтервалі від **49.88** км/год (внутрішній рейс Львів – Житомир) до **50.17** км/год (внутрішній

рейс Вінниця – Запоріжжя), що відповідає міжнародним нормам по середньої швидкості руху великогазових та/або великогабаритних транспортних засобів, яка складає **50** км/год.

ПІК ІСВПнаТСУтаЗС у процесі своєї роботи відкидав ділянки ДТМ, які не задовольняли умовам руху великогазових та/або великогабаритних транспортних засобів, а саме – максимальна загальна маса автопоїзда – 40 тонн (для контейнеровозів до 44-46 тонн), навантаження на одинарну вісь – до 11 т, здвоєну – 16 т, строєну – 22 т, габарити не повинні перевищувати 4 м у висоту, 2.6 м завширшки та 22 м завдовжки.

### Список літератури:

1. Цюнь О.П., Плекан У.М. Транспортно-експедиторська діяльність в Україні. Перспективи відбудови. Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф., [Житомир], 24-26 жовт. 2022 р. / Житомирська політехніка. Житомир, 2022. С. 147.
2. Rasa Subačienė, A. Krutova, O. Nesterenko. Determinants of sustainable development in the post-war recovery of Ukraine / Economics of Development. Ed. by T. Shtal (Editor-in-Chief) et al. Kharkiv: Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 2023. Vol. 22, No. 4. P. 23–33. DOI: <https://doi.org/10.57111/ekon/4.2023.23>
3. Лановий О.Т., Кисельов В.Б., Кошарний О.М. Аналіз і бізнес-планування функціонування автомобільної дороги «Київ – Одеса» на платній та безоплатній основі. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. Том 36 (75). № 6. 2025. С. 270–276. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/40>
4. Прокудін Г.С., Прокудін О.Г., Назарова А.П. Система аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів. *Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник, Серія «Технічні науки» та серія «Економічні науки»*. 2023. Вип. № 3 (57). С. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-3-57-099-109>
5. Прокудін Г.С., Дудник О.С., Іщенко М.Г. Комп'ютерна програма “Програмно-інструментальний комплекс оптимізації пасажирських та вантажних перевезень в транспортних системах України і Західної Європи”: Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір / № 48530, Державна служба інтелектуальної власності України. – заяв. 30.01.2013 № 48730; реєстр. 01.04.2013. 67 с.
6. Prokudin G., Chupaylenko A., Khabotnia T., Remekh I., Lyamzin A., Kovalenko M. Optimizing Unbalanced Freight Deliveries in Transportation Networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. N. 2/3 (116). P. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253791>
7. Прокудін Г.С., Єрко Я.В., Редіч Ю.А. Розв'язання транспортної задачі про найкоротший шлях з використанням інформаційних технологій. *Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»*. 2021. Том 32 (71) № 2. Ч. 2. С. 206–211. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/32>
8. Прокудін Г.С., Єрко Я.В. Використання інформаційних технологій для знаходження найкоротшого шляху на транспортній мережі. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Вип. 109. 2021. Ч. 2. С. 28–39. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-3-57-099-109>

### Kiselyov V.B., Nazarova A.P. CONSTRUCTION OF RATIONAL ROUTES FOR TRANSPORTATION OF OVERSIZED CARGO ON THE NETWORK OF GENERAL USE ROADS OF STATE IMPORTANCE

*The article considers the methodology and results of experimental studies on the construction of rational routes for heavy and/or oversized vehicles on the network of public roads of state importance based on the calculation of the shortest distances in the case of a large number of intermediate points. Heavy and/or oversized cargo transported by road is oversized cargo. The dimensions of cargo transported on public roads in Ukraine must comply with strict standards and norms. In particular, according to the current traffic rules, transportation of oversized cargo can be carried out in specially prepared transport, the dimensions of which should not exceed 2 m 60 cm in width, 18.75 m in length and 4 m in height, counting from the road surface, the total weight of the tractor with the cargo is up to 40 tons. If at least one parameter exceeds the established*



*limits, the transportation is considered oversized or oversized. Then you need to apply for a special traffic permit, which is issued by Ukravtodor or the National Police.*

*The software and tool complex "Information System for Freight Transportation on the Transport Systems of Ukraine and Western Europe" was developed in the environment of the object-oriented programming language Delphi using the Access relational database as a database. Experimental verification of the operation of this complex was carried out on real data. 10 international and 10 domestic routes for heavy and/or oversized vehicles on the network of public highways of state importance of the transport systems of Ukraine and Western Europe were calculated based on the calculation of the shortest distances in the case of a large number of intermediate points. The current operational indicators of freight transportation routes were calculated: the cost of the trip, the time of the trip, the distance and the average speed. The developed database of the VE includes 812 transport nodes and 906 transport sections of the transport systems of Ukraine and Western Europe.*

*To solve the research problem, namely finding the shortest distance on the road and transport network, Dijkstra's algorithm was used.*

**Keywords:** *freight transportation, oversized cargo, shortest route, road transport network, optimization, international connection.*

Дата першого надходження статті до видання: 06.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.01.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Літвяк В.І.**<https://orcid.org/0009-0000-6261-927X>

Одеський національний морський університет

## КЛАСИФІКАЦІЯ ФАКТОРІВ ТАРИФОУТВОРЕННЯ ПРИ ДОСТАВЦІ КОНТЕЙНЕРІВ ТРАНСКАСПІЙСЬКИМ МІЖНАРОДНИМ ТРАНСПОРТНИМ МАРШРУТОМ

На сьогоднішній день значних змін зазнають маршрути міжнародних перевезень. Ряд чинників різних походжень змушують вантажовласників відмовлятися від використання традиційних шляхів доставки та переходити до інших, що в порівнянні користувалися меншою популярністю. На фоні цього навколо світу розвиваються альтернативні транспортні системи доставки вантажів. Одним з найбільших напрямків перевезень, вантажопотік між Китаєм та країнами Європейського Союзу, зазнав особливо значних змін в останні роки. Традиційно вантажі пересувалися двома шляхами: морським маршрутом та Північним коридором, але в останні роки більші об'єми вантажів почали йти Середнім коридором, також відомим як Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут (ТМТМ). Велика частина цього вантажопотоку складається з вантажів у контейнерах. Особливістю перевезення контейнерних перевезень є створення універсальних тарифних ставок для зацікавлених вантажовласників. Процес тарифоутворення для послуг перевезення є вкрай важливим для логістичних компаній, адже визначення конкурентоспроможних тарифів перевезення є ключовою умовою залучення клієнтури. У зв'язку з цим доцільним є визначення факторів, які певним чином впливають на собівартість перевезення контейнерів та подальше утворення тарифів. З метою структурування тарифоутворюючих чинників у статті формується їх класифікація. Вплив факторів розглянуто у контексті ТМТМ, також відомого як Середній коридор, який останнім часом набув популярності серед перевізників через низку політичних та економічних факторів. У результаті, були розглянуті чинники, які мають вплив на процес тарифоутворення контейнерних перевезень та їх важливість у контексті інтермодального перевезення Середнім коридором. Також, ці чинники були розподілені за трьома класифікаціями, основна з яких – за роллю факторів у процесі тарифоутворення.

**Ключові слова:** контейнер, інтермодальні перевезення, Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут, тарифоутворення, логістика, фактор, класифікація, провайдер.

**Постановка проблеми.** Контейнерні перевезення є одним з найбільш поширених способів доставки вантажів, у тому числі між Китаєм та країнами ЄС. За даними UNCTAD, у 2025 році об'єми контейнерних перевезень між Східною Азією та Європою лише морським шляхом склали 26,2 млн TEU, та прогноуються збільшитись у наступні роки [1, с. 8, 11]. Великі об'єми цього типу перевезення пов'язані з інтенсивною міжнародною торгівлею між двома регіонами та універсальністю перевезень, що дозволяє транспортувати широку різноманітність вантажів. Хоча основна частина вантажопотоків йде морським шляхом, в останні роки більшої популярності набувають наземні шляхи перевезення, особливо Середньою Азією. Морські перевезення контейне-

ровозами мають значну перевагу в плані масштабності вантажопотоків, наземне перевезення контейнерів показує себе швидшою та надійнішою альтернативою. Окрім цього, відбулися значні зміни у розподіленні наземних вантажопотоків за маршрутами доставки, що пов'язано з відмовою перевізників від використання Північного коридору, який проходить територією РФ.

Сьогодні логістичні компанії та компанії-перевізники налагоджують нові маршрути або схеми перевезення контейнерів наземним шляхом. Найбільш перспективним з них є Середній коридор, або Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут (ТМТМ), що проходить через країни Середньої Азії, Кавказу та Каспійське і Чорне моря. Цей шлях є географічно найкоротшим

зв'язком між країнами ЄС та Китаєм, що дозволяє забезпечення швидкої доставки вантажів у порівнянні з морським та іншими наземними шляхами перевезень. За останні декілька років використання цього маршруту для контейнерних перевезень стало значно популярнішим серед вантажовласників. У зв'язку з цим, актуальним стає питання визначення факторів, що впливають на тарифоутворення для контейнерних перевезень інтермодальним транспортом на вище зазначеному маршруті, та подальша їх класифікація.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Протягом років, питання тарифоутворення для контейнерних перевезень були об'єктом досліджень багатьох наукових праць. Пов'язано це не тільки з розвитком контейнерних перевезень вантажів у тарі, а також з їх трансформацією у контейнерну транспортно-технологічну систему «від дверей до дверей». Серед сучасних робіт в основному можна виділити аналізи процесу тарифоутворення для морських контейнерних перевезень [2, 3, 4]. Також, багато наукових робіт розглядають питання формування тарифних ставок на перевезення контейнерів з боку певних географічних регіонів [5, 6], або з акцентом на вплив окремих факторів [7, 8].

Повноцінний аналіз факторів впливу на ціноутворення для інтермодальних контейнерних перевезень у сучасних публікаціях не виконувався. Додаткову актуальність статті надає розгляд чинників тарифоутворення у контексті контейнерних перевезень на напрямку Китай-ЄС шляхом Середнього коридору.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз процесу тарифоутворення інтермодального перевезення контейнерів, зокрема шляхом Середнього коридору, та класифікація цих факторів за

їх характером та сферою впливу. Це досягається визначенням джерел впливу на перевезення контейнеризованих вантажів та дій вантажоперевізників у плані адаптації тарифної політики до них.

**Виклад основного матеріалу.** За останні роки відбулися ряд покращень, які призвели до більш поширеного використання Середнього коридору. Так, міжнародна асоціація «ТМТМ», що була заснована у 2014 р., проводить заходи для координації роботи компаній, які беруть участь у перевезеннях, а також над залученням інвестицій у розвиток транспортної інфраструктури вздовж маршруту перевезень. Завдяки цьому, річні показники контейнерних перевезень Середнім коридором збільшилися у два рази за останні п'ять років (рис. 1) [9].

За оцінкою Європейського банку реконструкції та розвитку, до 2030 року об'єми перевезень можуть збільшитися ще до 110 тис. перевезених TEU на рік при сценарії звичайної діяльності, тобто незважаючи на вплив поточних та майбутніх проєктів підвищення пропускної спроможності та злагодження інтермодальних перевезень (рис. 2) [10].

Підвищений рівень використання Середнього коридору для контейнерних перевезень тягне появу на ринку транспортних компаній, які надають вантажовласникам комплексні послуги з перевезення їх вантажів у контейнерах Середнім коридором. Так, організація «ТМТМ» пропонує зацікавленим вантажовласникам комплексні ставки контейнерних перевезень між логістичними центрами Казахстану (Алтинколь, Караганда, Достик) та Європи (Будапешт, Дуйсбург, Славкув та ін.).

Важливою частиною організації контейнерних перевезень є визначення тарифної політики транспортної компанії. За своєю сутністю цей процес

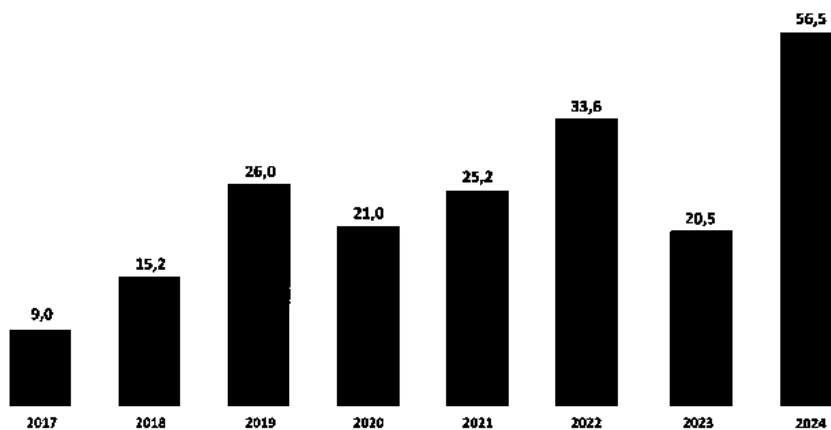


Рис. 1. Річний об'єм контейнерних перевезень по ТМТМ (тис. TEU)

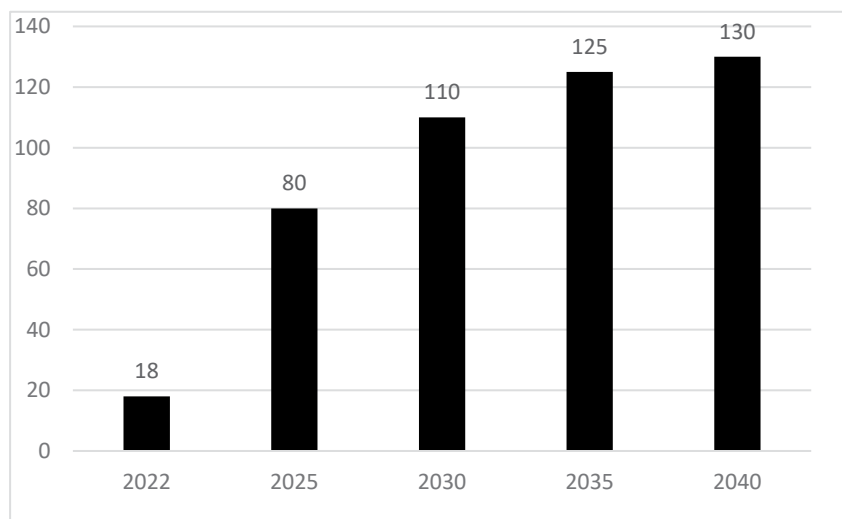


**Рис. 2. Оцінка обсягів контейнерних перевезень на Середньому коридорі у 2022-40 рр., сценарій звичайної діяльності, тис. TEU**

тотожний з процесом ціноутворення підприємства. Ціноутворення – це процес формування та встановлення цін, який прямо пов'язаний з прийняттям цінового рішення, що визначає рівень ціни на продукцію (роботи, послуги) та відповідно стратегічні і тактичні напрями цінової політики [11, с. 11]. Це рішення приймається керівництвом підприємства на основі економічного аналізу вартості виробництва та зовнішніх ринкових факторів.

У випадку інтермодального перевезення контейнерів, для визначення тарифів перевезення можна розглянути компанію 3PL-провайдер (далі – провайдер), яка надає своєму клієнту, вантажовласнику, послугу організації інтермодального перевезення вантажів у контейнерах. Початковою точкою перевезення можна визначити казахстанські залізничні вузли на кордоні з Китаєм – Достик та Алтинколь. Вантажі у контейнерах, що туди надходять, формуються у залізничні потяги або перевантажуються на вантажівки для подальшого перевезення до портів Каспійського моря. Після перевезення контейнерів через Каспійське море, контейнери доставляються до одного з транспортних хабів у ЄС, який, в більшості випадків, визначається остаточним пунктом призначення вантажу. Логістична компанія при цьому співпрацює з рядом компаній-перевізників залізничного, автомобільного або водного транспорту, митних брокерів, портових операторів та операторів перевантажувальних станцій. Вона забезпечує раціонально швидку та безпечну доставку вантажів від моменту прийняття контейнерів для перевезення до їх фінальної передачі для доставки останньої милі.

На процес визначення тарифів інтермодального перевезення впливає різноманіття взаємопов'язаних факторів. Вони можуть походити як зсередини середовища перевезення, так і ззовні. Зазвичай, компанії, що надають послуги лінійних перевезень, пропонують своїм клієнтам певну базову ставку та додаткові надбавки або знижки, які залежать від умов перевезення вантажів.

У найпростішому вигляді, процес тарифоутворення базується на виборі провайдером схеми перевезення. Від цього вибору залежить комбінація окремих компаній-перевізників та операторів транспортних вузлів, які безпосередньо забезпечують перевезення вантажу. Загальна структура наскрізної тарифної ставки для інтермодального перевезення контейнерів вказана на рис. 3.

Доцільним є розподілення факторів тарифоутворення за характером їх впливу на процес прийняття цінового рішення. Можна виділити три групи чинників за їх роллю у процесі тарифоутворення:

- чинники, що впливають на вибір схеми доставки;
- чинники, що впливають на умови перевезення;
- чинники, що впливають на остаточне цінове рішення.

В першу чергу, існує ряд чинників, які впливають на процес вибору тарифної політики на стадії вибору та організації схеми доставки контейнерів. Середній коридор включає у себе декілька паралельних ділянок, що дозволяє компанії-провайдеру обрати найбільш підходящий

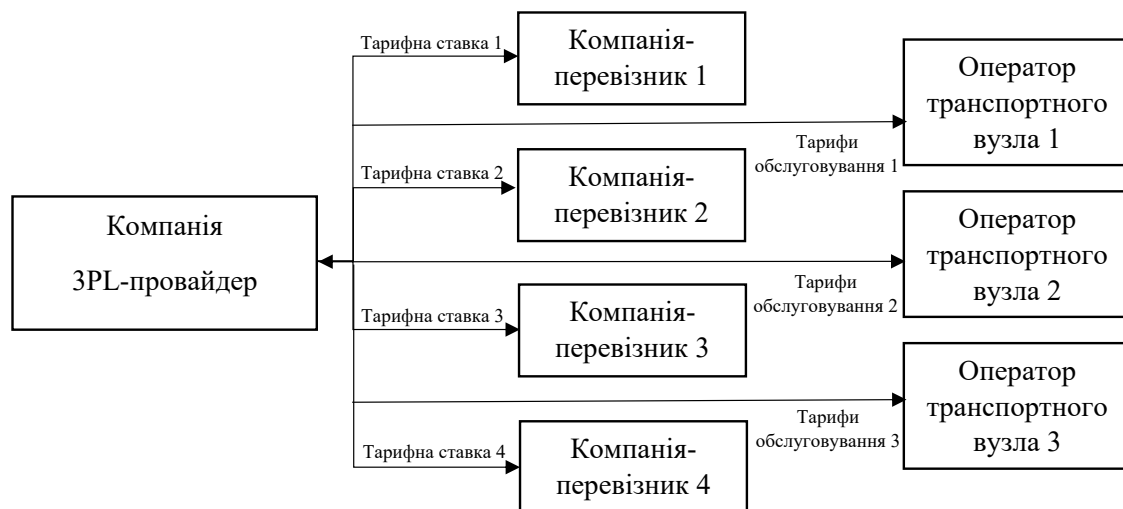


Рис. 3. Структура наскрізної базової ставки інтермодального перевезення

маршрут доставки в залежності від вимог вантажовласника.

Двома основними факторами, що впливають на вибір маршруту перевезень є домовлені пункти відправлення і призначення та тривалість перевезення. Наприклад, в залежності від домовленості з вантажовласником щодо тривалості доставки, в тому числі від вимог до вантажу і терміновості перевезень, провайдер може вибрати менш економічно ефективний маршрут, але який забезпечує швидшу доставку вантажу.

Окрім цього, вибір маршруту перевезень може бути афектований вартістю послуг операторів транспортних вузлів. Портові збори можуть вплинути на вибір певних портів Каспійського та Чорного моря, або взагалі обійти морське перевезення у Чорному морі. При останньому, додатковий вплив на утворення тарифів може створити вартість опрацювання контейнерів при зміні ширини колії. Така операція може відбуватися при перевезенні на певних ділянках ТМТМ (Ахалкалакі-Карс, Чорноморськ-Славкув, Чоп-Феньєшлітке).

Також, на перевезення значний вплив має завантаженість транспортних вузлів на шляху доставки. Велика завантаженість у морських портах та на залізничних станціях може призвести до затримок у перевезенні. Понижена надійність розкладу перевезення може бути негативним чинником у процесі тарифоутворення та спонукати провайдера обирати інші маршрути доставки.

На вибір схеми доставки також впливає ряд зовнішніх чинників, які не підконтрольні компанії-провайдеру. Військові дії, погода та стихійні явища, страйки робітників транспортної галузі можуть завадити використанню певних тран-

спортних вузлів та ділянок, що призводить до змін у тарифуванні перевезення через вимушену зміну маршруту перевезення контейнерів.

Після того, як провайдером обрана схема доставки, до процесу тарифоутворення вступають чинники, пов'язані з умовами перевезення. Вони впливають на собівартість перевезення, яка, в свою чергу, закладається в основу визначення тарифу.

В першу чергу, вартість перевезення залежить від обраних провайдером компаній-перевізників. Декілька різних перевізників можуть працювати на одній й тій самій ділянці та пропонувати різні тарифні ставки провайдеру. Також, велике значення має кількість перевізників, що приймають участь у доставці контейнерів – деякі транспортні компанії можуть пропонувати комбіновані ставки для перевезення контейнерів одразу по декільком послідовним ділянкам, що може впливати на загальну вартість перевезення. Варто відзначити, що компанія-провайдер має вибір між різними видами наземного транспорту на певних ділянках Середнього коридору, обираючи автомобільний або залізничний транспорт в залежності від вимог до тривалості та вартості перевезення. Якщо залізничний транспорт надає дешевше перевезення за рахунок більших об'ємів, автомобільний транспорт здатен доставляти вантажі значно швидше, тому його використання може бути доцільним у деяких випадках.

Цей фактор також залежить від типу фітінгових платформ, що використовуються при перевезенні. Сьогодні існують технології, що дозволяють змінювати ширину між колесами залізничних вагонів. Від цього залежить тривалість прохо-

дження та вартість обробки контейнерів у пунктах зміни колії. У протизаг, вартість оренди та технічного обслуговування більш сучасного рухомого складу також впливає на собівартість перевезення.

Загалом, технічне та технологічне забезпечення інтермодального перевезення має значний вплив на собівартість доставки контейнерів. Чинники, пов'язані з собівартістю перевезень включають місткість транспортних засобів (контейнеро-місткість морських суден, довжина контейнерних потягів), форму власності та тип контейнерів, що використовуються (як от 20- або 40-футові, рефрижераторні або універсальні), завантаження контейнерів (FCL або LCL), доступність порожніх контейнерів для перевезення вантажів, що впливає на вартість їх оренди.

На собівартість перевезення також можуть впливати чинники, пов'язані з експлуатацією транспортних засобів. По-перше, собівартість значно залежить від вартості палива залучених до перевезень видів транспорту. Морські лінійні перевізники для врахування цієї залежності при наданні тарифної пропозиції клієнту додають до базисної ставки лінії (Basic Freight Rate – BAS) бункерну надбавку (Bunker Adjustment Factor – BAF), яка ураховує можливе коливання цін на бункер у визначений період. Так само, вартість технічного обслуговування транспортних засобів впливає на собівартість перевезення, яка береться провайдером за основу при розрахунку конкурентноспроможного тарифу перевезення контейнерів.

Іншою умовою, яка впливає на перевезення є вид вантажу, що перевозиться. Від нього залежать певні умови, через які перевізник може вводити додаткові надбавки до базової ставки. Наприклад, вантажі, що швидко псуються, можуть потребувати використання рефрижераторних контейнерів, що підвищує вартість перевезення, та більш ефективною у часі схеми доставки. Інші види вантажів можуть так само потребувати спеціалізованих контейнерів. Високовартісні вантажі також можуть стати причиною впливу на тарифні ставки через ряд факторів (швидкість доставки, страхування, митне оформлення). Також, на собівартість доставки впливають кількість та характер необхідних операцій над вантажем та контейнерами, що напряму залежить від виду вантажу, що перевозиться.

Ще одним фактором тарифоутворення перевезень є стан інфраструктури вздовж маршруту доставки контейнерів. Безперечним фактом є те, що технологічний розвиток транспортних систем

напряму впливає на вартість, швидкість та потенційні об'єми вантажних перевезень. Це означає, що використання більш технологічно просунутих ділянок у маршруті доставки може бути більш привабливим для компанії-провайдера і, у наслідок, призводити до зміни тарифної ставки для певних схем доставки контейнерів.

Також, частину вартості перевезення складають митні збори та оплата послуг митних брокерів. Отже, одним з факторів утворення тарифної ставки перевезення є митна політика між державами, на територіях яких проходить обраний провайдером маршрут доставки.

Остання група факторів, що впливає на тарифоутворення інтермодальних перевезень контейнерів, складається з чинників, що безпосередньо не впливають на процес перевезення, але мають важливу роль у прийнятті цінового рішення. В основному, це економічні фактори, які пов'язані з попитом та пропозицією на контейнерні перевезення між регіонами, що розглядаються.

Найбільшим з них є співвідношення попиту та пропозиції у послугах доставки контейнеризованих вантажів. Метою коректного тарифоутворення для інтермодальних перевезень є формування тарифної політики, що якнайкраще задовольняє попит та дозволяє отримати найбільшу можливу маржу при наданні можливих об'ємів послуг транспортування.

З попитом на контейнерні перевезення пов'язані декілька інших чинників:

- сезонні чинники – об'єми контейнерних перевезень не є сталим показником та відчувають коливання протягом року. Відповідно, компанія-провайдер може вводити додаткові надбавки у період підвищеного попиту на перевезення;

- тарифи на контейнерні перевезення конкуруючими маршрутами – оскільки інтермодальне перевезення контейнерів Середнім коридором є лише альтернативою традиційному перевезенню морським шляхом, провайдери перевезень мають надавати конкурентні тарифи задля залучення клієнтів;

- об'єми та регулярність перевезень – для перевізника є економічно привабливим робота з клієнтами, які потребують постійних перевезень великих об'ємів вантажів. Через це, компанія-провайдер може пропонувати вантажовласникам, що відправляють великі партії вантажу або є регулярними клієнтами, більш вигідні умови договору перевезення;

- напрямок перевезення вантажів – через незбалансованість контейнерного вантажопо-

току між Східною Азією та Європою, більшим попитом користуються перевезення у західному напрямку. У наслідок цього, тарифні ставки з Китаю до країн ЄС значно перевищують тарифи на перевезення у зворотному напрямку.

Важливим чинником, який беруть до уваги перевізники при визначенні тарифних ставок, є валюта ставки та валюта платежу. У випадку, якщо вони різняться, остаточна плата за перевезення буде залежати від коливання курсу валют. У зв'язку з цим, транспортні компанії можуть вводити надбавки для певних вантажовласників.

Страховання є ще одною важливою складовою тарифоутворення інтермодальних контейнерних перевезень. Вартість страхування може залежати від різних факторів. Вартість та вид контейнеризованого вантажу відомі провайдеру заздалегідь, отже їх вплив на страхові витрати може бути одразу закладений у базовий тариф перевезення. Інші чинники, такі як умови перевезення, маршрути доставки та військові дії у регіоні, можуть змінюватися з часом, а отже виражатися у певній надбавці за додаткове страхування.

На основі вище сказаного, розподілимо розглянуті фактори за трьома класифікаціями: за роллю у процесі тарифоутворення, що було розглянуто вище; за походженням цих факторів; за їх типом.

Фактори ціноутворення можна розподілити за їх походженням наступним чином:

1. ті, що походять від компаній, залучених у процесі перевезення контейнерів:

- маршрут доставки;
- залучені види транспорту;
- кількість перевізників;
- тарифи залучених компаній-перевізників;
- технологічне обладнання транспортних засобів;
- вартість обслуговування транспортних засобів
- контейнеромісткість транспортних засобів;
- розмір контейнерів;
- форма власності контейнерів;
- тариф послуг операторів вузлів;
- завантаженість транспортних вузлів.

2. ті, що походять від вантажовласника та вантажу:

- вид вантажу;
- тривалість доставки;
- тип контейнерів;
- пункти відправлення та призначення;
- напрямки перевезень;
- об'єми та регулярність перевезень;
- завантаження контейнерів;

– договірні умови між перевізником та вантажовласником.

3. ті, що походять зі зовнішнього середовища:

- попит та пропозиція на перевезення;
- тарифи конкуруючих маршрутів доставки;
- сезонність перевезень;
- вартість палива;
- транспортна інфраструктура вздовж маршруту перевезення;
- доступність порожніх контейнерів у точках відправлення;
- митне оформлення;
- страхування вантажів;
- коливання курсу валют;
- військові дії;
- страйки робітників;
- стихійні явища.

Також, чинники можуть бути розподілені за їх типом:

1. організаційні;
2. експлуатаційні;
3. економічні;
4. політичні/соціальні.

**Висновки.** Розглянувши фактори, які впливають на тарифоутворення інтермодальних контейнерних перевезень, визначено три ознаки їх класифікації. Дві з них: класифікація за походженнями та за типом – дає можливість оцінити джерела чинників впливу на тарифи перевезення та їх специфіку. Така класифікація може бути використана для аналізу процесу тарифоутворення та оцінки можливості контролю над ними зі сторони компанії-провайдера логістичних послуг.

Крім того, була описана класифікація факторів за їхньою роллю безпосередньо у процесі тарифоутворення контейнерних перевезень. Ця класифікація виділяє три групи чинників: чинники, що впливають на вибір схеми доставки; що впливають на умови перевезення; та що впливають на остаточне цінове рішення. Подібне розподілення чинників дозволяє більш ефективно чисельне відображення при побудові математичних моделей тарифоутворення. Завдяки схожій сутності впливу згрупованих факторів, вони можуть об'єднуватися у групи обмежень, або навіть у єдине обмеження.

Доцільним є подальша побудова математичних моделей процесу тарифоутворення для інтермодального перевезення контейнерів та більш глибокий аналіз математичного представлення впливу окремих факторів. Доставка контейнерів Середнім коридором є гарним практичним прикладом для моделювання процесу тарифоутворення.



## Список літератури:

1. Конференція ООН з торгівлі та розвитку. Review of maritime transport 2025: Staying the course in turbulent waters. 2025. URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025_en.pdf) (дата звернення: 14.01.2026).
2. Meng Q., Zhao H., Wang Y. Revenue management for container liner shipping services: Critical review and future research directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2019. Vol. 128. P. 280–292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.06.010>.
3. Matsuda T., Hirata E., Kawasaki T. Monopoly in the container shipping market: an econometric approach. *Maritime Business Review*. 2022. Vol. 7.4. P. 318–331. DOI: <https://doi.org/10.1108/MABR-12-2020-0071>.
4. Schönberger J. Model-based long-term pricing in maritime container shipping. *Sustainability Management Forum | NachhaltigkeitsManagementForum*. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2020. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00550-020-00496-z>.
5. Ubaid A., Hussain F., Charles J. Modeling shipment spot pricing in the Australian container shipping industry: case of ASIA-OCEANIA trade lane. *Knowledge-based systems*. 2020. Vol. 210. 106483.
6. Grosso M., Lynce A.-R., Silla A., Vaggelas G.K. Short Sea Shipping, intermodality and parameters influencing pricing policies: the Mediterranean case. *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking*. 2010. Vol. 11.1. P. 47–67. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11066-009-9039-0>.
7. Macharis C., Van Hoesck E., Pekin E., van Lier T. A decision analysis framework for intermodal transport: Comparing fuel price increases and the internalisation of external costs. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2010. Vol. 44.7. P. 550–561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.04.006>.
8. Yin M., Kim K.H. Quantity discount pricing for container transportation services by shipping lines. *Computers & Industrial Engineering*. 2012. Vol. 63.1. P. 313–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.03.008>.
9. Офіційний веб-сайт «Середній коридор – TMTM». URL: <https://middlecorridor.com/en/> (дата звернення: 14.01.2026).
10. Європейський банк реконструкції та розвитку. Sustainable transport connections between Europe and Central Asia. 2023. URL: [https://transport.ec.europa.eu/system/files/2023-06/Sustainable\\_transport\\_connections\\_between\\_Europe\\_and\\_Central\\_Asia.pdf](https://transport.ec.europa.eu/system/files/2023-06/Sustainable_transport_connections_between_Europe_and_Central_Asia.pdf) (дата звернення: 14.01.2026).
11. Жихарева В.В., Онешко С.В. Ціноутворення на морському транспорті: навчальний посібник. Одеса: ОНМУ, 2018. 230 с.

# Litviak V.I. PRICING FACTOR CLASSIFICATION CONTAINER DELIVERY VIA THE TRANS-CASPIAN INTERNATIONAL TRANSPORT ROUTE

Today, international shipping routes are undergoing significant changes. A number of factors of various origins are forcing cargo owners to abandon traditional shipping routes and switch to others that were less popular in comparison. Due to this, alternative transport systems for cargo delivery are developing around the world. One of the largest transportation routes, cargo traffic between China and the European Union, has undergone particularly significant changes in recent years. Traditionally, cargo moved along two routes: the sea route and the Northern Corridor, but in recent years, larger volumes of cargo have begun to ship along the Middle Corridor, also known as the Trans-Caspian International Transport Route (TMTM). A large part of this cargo flow consists of cargo in containers. A feature of containerized transportation is the creation of universal tariff rates for interested cargo owners. The process of pricing for transportation services is extremely important for logistics companies, because the determination of competitive transportation prices is a key condition for attracting clientele. In this regard, it is rational to determine the factors that in a certain way affect the cost of container transportation and the subsequent formation of tariffs. In order to structure pricing factors, their classification is outlined in the article. The impact of factors is considered in the context of the Trans-Caspian International Transport Corridor, also known as the Middle Corridor, which has recently gained popularity among carriers due to a number of political and economic factors. As a result, the factors that influence the process of pricing for container transportation and their importance in the context of intermodal transportation via the Middle Corridor were considered. In addition to that, these factors were divided into three types of classifications, the main one of which is the role of factors in the pricing process.

**Keywords:** container, intermodal transportation, Trans-Caspian international transport route, pricing, logistics.

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 656.073

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/46>

**Миронюк І.І.**

<https://orcid.org/0009-0002-2452-5031>

Національний транспортний університет

**Васілова Г.С.**

<https://orcid.org/0000-0002-4168-1434>

Національний транспортний університет

**Горецький О.А.**

<https://orcid.org/0000-0002-2656-6120>

Національний транспортний університет

**Юрченко Д.О.**

<https://orcid.org/0009-0006-5528-1278>

Національний транспортний університет

## ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ТА ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ У ХОЛОДНИХ ЛАНЦЮГАХ ЕКСПОРТУ ШВИДКОПСУВНОЇ ПРОДУКЦІЇ УКРАЇНИ ДО ЄС

У статті проаналізовано експорт швидкопсувної продукції України до країн ЄС у період воєнного стану, коли після 2022 року основні вантажопотоки були переорієнтовані на сухопутні коридори та порти ЄС. Для температурно чутливих вантажів (м'ясо і м'ясопродукти, молочна продукція, риба, ягоди, свіжі овочі та фрукти, заморожені товари) ключовим обмеженням визначено не «відстань маршруту», а варіативність транзитного часу та зростання частки простоїв у загальному циклі доставки. Пікові затримки на кордоні до 7 діб трансформують логістику з планової у стохастичну: підвищуються витрати на підтримання холоду в режимі очікування, зростає ризик температурних відхилень у критичних точках, порушується ритмічність постачань і прогнозованість контрактного сервісу.

Методологічну основу становить порівняльний аналіз двох транспортно-технологічних конфігурацій – «road-only» та комбінованої «rail-road» – із виділенням критичних точок холодового ланцюга (пункти пропуску, інтермодальні термінали, стики видів транспорту) та оцінюванням керованості температурного режиму через джерела енергоживлення, процедурну дисципліну і контрольні механізми. Показано, що рефрижераторні автомобілі залишаються необхідними для first/last mile, однак на довгих міжнародних плечах їх ефективність обмежується регламентованими режимами праці водіїв і зростанням енергетичних та екологічних витрат у режимах простою, коли автономні холодильні установки працюють тривалий час без транспортної продуктивності.

Обґрунтовано доцільність використання рефрижераторних контейнерів як стандартизованої холодової вантажної одиниці для мультимодальних схем із залізничним плечем на магістральній дистанції та автомобільним сегментом на «останній милі». Контейнеризація зменшує кількість маніпуляцій із продукцією на стиках, переносить критичні операції у термінальне середовище з можливістю мережевого живлення та контрольованого накопичення, підвищує відтворюваність температурного режиму і знижує залежність холодового ланцюга від випадкових дорожніх затримок.

**Ключові слова:** холодний ланцюг, швидкопсувні вантажі, вантажні перевезення, експортна логістика, експлуатація транспортних засобів, комбіновані перевезення, рефрижераторний транспорт, транспортні технології.



**Постановка проблеми.** Після 2022 року зовнішньоторговельна логістика України була вимушено перебудована з морськоорієнтованої моделі на систему сухопутних коридорів і портів ЄС, що різко підвищило частку транзитних операцій, стиків видів транспорту та некерованих простоїв у загальному циклі доставки. За офіційними даними Європейської Комісії, «*Solidarity Lanes*» з травня 2022 р. забезпечили переміщення понад 200 млн т товарів, значна частка яких припадала на аграрну продукцію, тобто саме на номенклатуру з підвищеною чутливістю до часу і температури [1]. Для швидкопсувних вантажів така структурна переорієнтація означає не «зміну маршруту», а зміну профілю ризику: транзитні цикли подовжуються, частішають зупинки на прикордонних та вузлових ділянках, зростають вимоги до енергетичної стійкості перевезення і доказовості дотримання температурних режимів. У результаті ключовим фактором збереження якості стає не номінальна тривалість перевезення, а співвідношення часу руху до часу простою та здатність системи підтримувати стабільний режим під час затримок, які не додають цінності продукту, але формують прямі витрати та втрати.

Проблема набуває прикладної гостроти через те, що ризики для холодового ланцюга тепер концентруються саме в зонах, де транспорт «не працює як транспорт»: у чергах на кордоні, на підходах до терміналів, у режимі очікування зміни тяги або перевантаження. Європейська Бізнес Асоціація фіксувала періоди, коли затримки на кордоні для швидкопсувних товарів зростали до 7 діб, а компанії зазнавали суттєвих втрат унаслідок простоїв і зривів графіків постачання [2]. За таких умов автомобільний рефрижераторний транспорт зберігає незамінність на етапах підвезення та розвезення, однак «road-only» модель на довгих експортних плечах дедалі частіше виявляється економічно вразливою й операційно ризиковою: зростає собівартість через додаткове споживання пального для підтримання холоду в простої, посилюються обмеження режимів праці водіїв у ЄС, а також підвищується ймовірність температурних відхилень і претензій за якістю в ланцюгу постачання [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідницьке поле, в межах якого формується проблема експортної логістики швидкопсувної продукції України до ЄС, у 2022–2025 рр. демонструє зсув від «географії маршрутів» до «інженерії надійності ланцюга», де визначальними стають не номінальні кілометри, а керованість часу,

енергетики та температури в умовах прикордонних і транзитних дисфункцій [1].

На рівні емпіричних сигналів ринку ключову роль відіграють публікації бізнес-інституцій, які квантифікують не «складність», а граничні режими функціонування ланцюга. Повідомлення *European Business Association* про зростання затримок швидкопсувних вантажів на кордоні до 7 діб задає параметр, який у термінах холодової логістики означає різке збільшення частки часу простою у загальному циклі доставки та перенесення центру ризику з руху на очікування [2]. Підхід до *temperature management* як центрального механізму забезпечення якості в ланцюгах постачання швидкопсувних продуктів, де критичні точки формуються саме там, де контроль слабшає, а варіативність температури зростає; автори розглядають управління температурою як умову відтворюваності якості, а не як допоміжну операцію транспортування [6]. Економічне обґрунтування вразливості «road-only» моделі в умовах блоkad і черг запропоновано підхід до оцінювання збитковості міжнародних автоперевезень швидкопсувних вантажів за наявності прикордонної блокади [3]. Регуляторно-експлуатаційний вимір обмежень дорожнього сегмента системно окреслений у матеріалах EUR-Lex, що інтерпретують вимоги Regulation (EC) No 561/2006 щодо часу керування та відпочинку [4]. Додатково, екологічний компонент «дорожнього холоду» як прихована складова собівартості і ризиків підкріплюється звітом Robinson (Zemo Partnership), який фокусується на викидах від дизельних допоміжних холодильних установок (auxTRU) і тим самим демонструє, що режим «холод у простої» несе непропорційно високий екологічний тягар порівняно з режимом руху [5]. Технічні брошури CMA CGM щодо рефрижераторних контейнерів формують прикладний опис функціональної спроможності контейнера як автономної холодильноконтрольованої вантажної одиниці, здатної зберігати режим у мультимодальному циклі та інтегруватися в термінальну інфраструктуру [7]. Натомість ATR (UNECE) задає правовий «каркас» вимог до перевезення швидкопсувних харчових продуктів і спеціального обладнання, що забезпечує легітимність та уніфікацію процедур контролю незалежно від модальності [8]. На рівні політики сталого транспорту, публікації European Environment Agency аргументують переваги залізничного й водного транспорту як низьковуглецевих модальностей, що перетворює інтермодальні рішення з «опції» на напрям структурної адаптації логістики під екологічні пріо-

ритети ЄС [9]. Практична реалізованість таких рішень підтверджується кейсовими матеріалами UIRR щодо контейнерного поїзда з України до Іспанії, де демонструється наявність регулярних/організованих сервісів контейнеризації та можливість транспортування «на далеку Європу» без залежності від критичних вузлів дорожнього трафіку [10].

Наявні публікації та аналітичні матеріали переконливо фіксують масштаб переорієнтації українського експорту на сухопутні коридори ЄС та інституційне оформлення нових маршрутів у межах «*Solidarity Lanes*» [1], а також засвідчують критичність прикордонних затримок для швидкопсувних вантажів (до 7 діб) і пов'язані з цим прямі втрати бізнесу [2]. Окремі наукові роботи обґрунтовують економічну вразливість дорожньої моделі перевезень у разі блоkad, демонструючи механізми формування збитковості через простої й порушення ритмічності поставок [3], тоді як регуляторні джерела визначають жорсткі часові обмеження для автотранспорту на довгій дистанції [4]. Водночас у наявному дискурсі недостатньо розв'язаною залишається прикладна частина проблеми, а саме технологічно-економічне зіставлення «road-only» та інтермодальної контейнерної схеми для холодного експорту за умов воєнного часу з опорою на операційні параметри, які фактично визначають якість і собівартість: структуру транзитного часу (частка простоїв), режими та джерела енергозабезпечення холоду під час затримок, ризики температурних відхилень у вузлових точках, а також можливості доказового контролю режиму в логіці вимог до перевезення швидкопсувних харчових продуктів і спеціального обладнання (АТР) [8]. Не отримали достатньої уваги й умови відтворюваності інтермодальних рішень у практиці українських експортерів: які інфраструктурні передумови необхідні на прикордонних і тилових терміналах (підключення reefer, накопичення, операційні слоти), які процедурні вимоги є критичними (передрейсова підготовка, стандартизація документування режимів), та як ці умови корелюють із екологічними та економічними вимогами ринку ЄС з огляду на відмінності в інтенсивності викидів для різних модальностей [9].

**Постановка завдання.** Метою статті є обґрунтування доцільності використання рефрижераторних контейнерів і комбінованих перевезень у системі експорту швидкопсувної продукції України до країн ЄС шляхом порівняльного аналізу технологічних, економічних і екологічних

параметрів інтермодальної моделі (залізничний транспорт на магістральному плечі та автомобільний транспорт на етапах підвезення/розвезення) з моделлю виключно автомобільного рефрижераторного перевезення на довгій дистанції.

Для досягнення поставленої мети у статті вирішуються такі завдання: здійснити систематизацію ризиків холодового ланцюга для швидкопсувних вантажів в умовах переорієнтації експорту на сухопутні коридори ЄС з урахуванням фактора багатоденних затримок на кордоні [2] та інституційних параметрів функціонування «*Solidarity Lanes*» [1]; визначити експлуатаційні та регуляторні обмеження автомобільних рефрижераторних перевезень на довгих міжнародних маршрутах, включно з впливом режимів праці водіїв [4] і додаткових витрат/викидів від роботи холодильного обладнання в режимах простою [5]; обґрунтувати технологічні переваги рефконтейнерів як стандартизованої холодової вантажної одиниці для інтермодальних ланцюгів з урахуванням технічних характеристик reefer-обладнання [7] та нормативних вимог АТР до перевезення швидкопсувних продуктів [8]; зіставити потенціал інтермодальних схем із пріоритетами низьковуглецевого транспорту, акцентуючи на доцільності перенесення магістрального плеча на залізницю/водний транспорт [9]; узагальнити прикладні передумови реалізації контейнерних сервісів між Україною та віддаленими ринками ЄС на основі практик запуску контейнерних поїздів і маршрутів [10] та сформулювати прикладні рекомендації щодо вибору транспортної технології для експортерів швидкопсувної продукції залежно від маршруту й профілю ризику.

**Виклад основного матеріалу.** Для обґрунтування вибору транспортно-технологічних рішень у системі експорту швидкопсувної продукції до країн ЄС доцільно насамперед проаналізувати фактичну структуру експортних потоків за видами транспорту. На основі статистичних даних Eurostat узагальнено динаміку обсягів експорту швидкопсувної продукції України у 2021–2024 рр. з виділенням автомобільного, залізничного та морського транспорту (рис. 1).

Отримані результати свідчать про домінування автомобільного транспорту в експорті швидкопсувної продукції України до країн ЄС у 2021–2024 рр., що зумовлено його гнучкістю, можливістю доставки «від дверей до дверей» та адаптивністю до змін прикордонної логістики. Подібні висновки щодо ключової ролі автомобільного транспорту у забезпеченні сталих ланцюгів

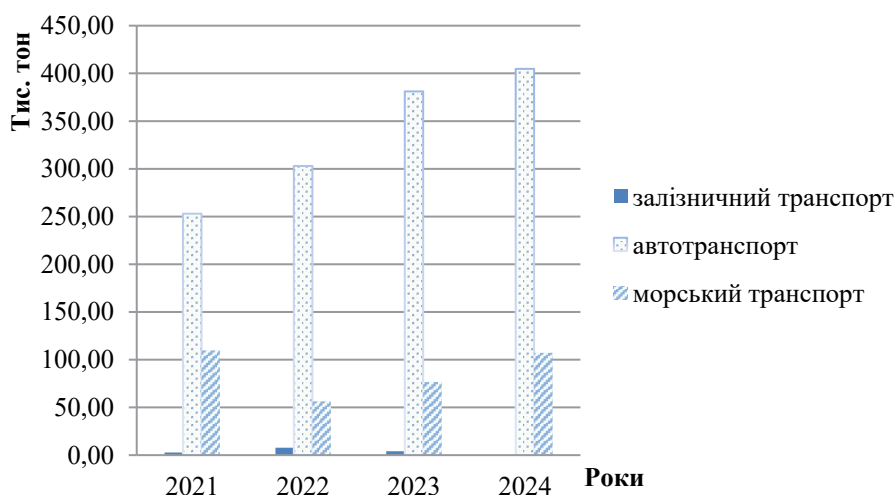


Рис. 1. Структура експорту України швидкопсувної продукції до ЄС за видами транспорту (2021–2024 рр.)

постачання швидкопсувних вантажів в умовах обмежень інфраструктури та зростання невизначеності наведені також у дослідженні [11]

Використання морського транспорту характеризується значною нестабільністю. Після різкого скорочення обсягів у 2022 р., що було зумовлено обмеженнями функціонування морських портів, у 2023–2024 рр. спостерігається часткове відновлення експортних потоків. Однак навіть за умов відновлення морський транспорт не забезпечує необхідної регулярності та надійності для більшості ланцюгів холодних поставок.

Обсяги перевезень залізничним транспортом залишаються порівняно незначними та характеризуються різкими коливаннями. Така ситуація свідчить про недостатній рівень використання залізничного транспорту у перевезеннях швидкопсувної продукції, що значною мірою пов'язано з обмеженою кількістю спеціалізованого рухомого складу та слабкою інтеграцією рефрижераторних контейнерів у міжнародні логістичні ланцюги.

Таким чином, емпіричні дані підтверджують структурну залежність експорту швидкопсувної продукції України до країн ЄС від автомобільного транспорту, водночас демонструючи обмежене використання залізничного та нестабільність морського сегментів. За умов зростання тривалості транзиту та частоти простоїв така модель підсилює ризики для холодового ланцюга. Це обумовлює необхідність пошуку транспортно-технологічних рішень, здатних поєднати гнучкість автомобільного підвезення з більшою передбачуваністю магістрального плеча, зокрема шляхом застосування рефрижераторних контейнерів у комбінованих перевезеннях.

Рефрижераторний автомобіль (ізотермічний кузов/напівпричіп з холодильним агрегатом) є базовим інструментом «холодного підвезення» на коротких і середніх відстанях. Його ключова перевага – висока оперативність та можливість точкового доступу до відправника/одержувача, що критично для партій з високою частотою відвантаження та вимогами до часу (свіжа продукція, охолоджене м'ясо, молочні продукти, фармацевтика). Разом із тим на маршрутах Україна–ЄС саме автомобільний сегмент акумулює основні ризики затримок і температурних відхилень, оскільки перебуває у прямій залежності від пропускної спроможності пунктів пропуску та режиму праці водіїв.

Регламент (ЄС) № 561/2006 встановлює обмеження на час керування, перерви та відпочинок водіїв у міжнародних автоперевезеннях. Практично це означає, що навіть за «ідеальних» дорожніх умов довге автомобільне плече має жорстку верхню межу продуктивності; будь-які черги на кордоні або об'їзди швидко трансформуються у додаткові цикли відпочинку, зміну екіпажу та/або необхідність стоянок із підтриманням температури [4].

Експлуатаційні обмеження посилюються специфікою холодильних установок. Зокрема, автономні дизельні агрегати (TRU) працюють під час руху і стоянки та генерують додаткові викиди NOx і PM у порівнянні з базовими викидами тягача/вантажівки; у звіті *Zemo Partnership* наведено результати вимірювань емісій для допоміжних холодильних двигунів на рефрижераторних транспортних засобах і підкреслено, що «холод» формує окремий екологічний і регуляторний профіль перевезення [5]. В умовах воєнного часу та блокад це перетворюється на прямі витрати:

підтримання режиму під час простоїв, додаткові заправки, сервіс агрегату та ризик відмови при тривалому навантаженні.

З точки зору якості, критичним є не лише «середня температура», а й амплітуда відхилень у часі. Температурні екскурсії прискорюють мікробіологічні та фізико-хімічні процеси, скорочують «залишковий ресурс» придатності та підвищують частку браку. У дослідженнях показано, що керування температурою в ланцюгах швидкопсувних продуктів має розглядатися як елемент забезпечення якості на всій довжині маршруту, а не як «опція» на окремих ділянках [6].

Рефрижераторний контейнер (ISO-reefer) є транспортною тарою, в якій холод створюється та контролюється в межах однієї «замкненої оболонки» незалежно від виду транспорту. На відміну від автомобільного рефрижератора, де «холод» функціонує у складі транспортного засобу, контейнер дозволяє уніфікувати вантажне місце для комбінованих схем: автомобільне підвезення–термінал–залізниця–термінал–розвезення. Це зменшує кількість перевантажень продукції як такої, і, відповідно, знижує ймовірність порушення температурного режиму через дверні операції, помилки комплектування або затримки на стику видами транспорту.

Технічні можливості сучасних контейнерів підтверджуються матеріалами операторів контейнерних ліній. Наприклад, у технічних брошурах СМА CGM описано діапазони температур та функції керування повітрообміном (*fresh air*), а також елементи енергоефективності (зокрема зменшення питомого споживання електроенергії за рахунок конструктивних рішень та управління режимами роботи) [7]. Це важливо для українського експортера, оскільки у мультимодальній схемі електроживлення може забезпечуватися стаціонарними «reefer plugs» на терміналі/станції, або автономним *genset* на автомобільній ділянці – з чітким розрахунком енергобалансу і часу безпечної автономності.

Нормативною основою для міжнародних перевезень швидкопсувних продуктів є Угода АТР, яка встановлює вимоги до спеціального обладнання для перевезення при контрольованій температурі та принципи підтвердження придатності такого обладнання. Для практики це означає необхідність керованості й документованості: класифікації транспортних засобів/контейнерів, періодичних перевірок, відповідності ізотермічних властивостей та функціонування холодильної установки [8].

Логіка комбінованої моделі полягає у винесенні «довгого плеча» на залізницю, а автомо-

біль залишити для гнучких ділянок *first/last mile*. У такій конфігурації контейнер стає єдиним носієм холодового режиму, а залізниця забезпечує більшу передбачуваність графіка на дистанції у сотні–тисячі кілометрів та знижує залежність від лімітів керування/відпочинку водія на основній частині маршруту. Додатковою перевагою є декарбонізація: за оцінками Європейського агентства з довкілля, залізничні та водні перевезення мають нижчу вуглецеву інтенсивність, ніж автомобільні, що робить інтермодальні схеми природним інструментом виконання «зеленої» логістики при збереженні якості продукту [9].

Під час блоkad і пікових черг комбінована схема також є інструментом управління ризиком. Дослідження українських авторів на матеріалах міжнародних перевезень вказують, що тривалі простої на кордоні прямо трансформуються у зростання собівартості та втрати від зриву контрактних графіків; у певні періоди ринок фіксував падіння обсягів автологістики та зростання «питомої» вартості одного рейсу [3]. Для швидкопсувних вантажів ключовим є те, що у контейнері можна будувати стандартизовану «програму виживання» на випадок затримки: запас енергоресурсу, перевірені точки підключення до живлення, алгоритм зміни режимів (наприклад, перехід з «*continuous*» на «*cycle*» за умови певної температури продукту), контроль точності датчиків і план взаємодії з терміналом.

Практика показує, що відмови холодового ланцюга найчастіше пов'язані не з «поломкою агрегату», а з порушенням процедур. Мінімальний набір операційних правил для експортера/перевізника включає: *pre-cooling* контейнера/кузова до цільового *setpoint* до завантаження; підтвердження коректності режимів та калібрування датчиків під час передрейсового контролю; контроль «температури продукту» (не лише повітря) у репрезентативних точках; управління дверними операціями (обмеження часу відкриття, використання штор/теплових завіс, планування митних процедур без зайвих відкриттів); резервні сценарії на випадок затримки (пункти підключення, сервісна підтримка, запас пального/*genset*, інструкція для водія) [6; 8].

Особливої уваги потребує енергетична складова. На автомобільній ділянці автономні холодильні двигуни можуть працювати тривалий час у режимі простою (черги, відстійники, нічні обмеження руху), формуючи додаткові витрати та викиди. З позиції екологічної відповідальності й майбутнього регуляторного тиску (вимоги до міських зон низьких викидів, обмеження на допо-

міжні двигуни) це посилює аргумент на користь перенесення довгого плеча на залізницю та стандартизації «холоду» у контейнері з живленням від мережі на терміналах [5; 9].

Публічні повідомлення бізнес-асоціацій фіксували ситуації, коли строки доставки зростали на 2–7 діб для продовольчих товарів, а логістичні витрати майже подвоювалися; для швидкопсувних вантажів це прямо конвертується у ризик зниження якості та втрату товарної вартості [2]. На прикладі регулярного контейнерного маршруту Україна–Іспанія (публікація UIRR) показано можливість проходження багатокраїнового плеча близько 2400 км з перевезенням 40-футових контейнерів у межах одного організованого сервісу (включно з транзитом через кілька держав ЄС) [10]. Хоча кейс описує аграрний вантаж, інфраструктурно та технологічно аналогічна модель може застосовуватися для рефрижераторних контейнерів за умови наявності «teefers plugs» на терміналах і керованого енергоживлення.

Ключові бар'єри впровадження рефконтейнерів у експорті швидкопсувної продукції до ЄС мають організаційно-інфраструктурний характер: доступність контейнерного обладнання та genset на автомобільному плечі; достатня кількість точок електроживлення на терміналах; синхронізація графіків поїздів та автопідвезення; уніфікація документування температури та відповідальності сторін (експортер–експедитор–перевізник–термінал). Нормативно важливо забезпечити відповідність АТР та внутрішнім вимогам ЄС до гігієни та простежуваності харчових продуктів, що передбачає наявність протоколів контролю і можливість аудиту [4; 8].

З практичної точки зору доцільно розглядати інтермодальну модель як портфельне рішення, а не як заміну автоперевезень «взагалі»: автомобільний рефрижератор залишається оптимальним у радіусі підвезення до 200–300 км і для невеликих партій з високою частотою відвантаження; рефконтейнер та залізничне плече – для стабільних потоків на далекі відстані та експорту у «вікнах ризику» (черги, сезонні піки, обмеження руху). Економічну доцільність слід підтверджувати розрахунком повної вартості володіння (ТСО), враховуючи витрати на очікування/простій, енергоре-

сурс, втрати від погіршення якості та штрафи за зрив контрактних термінів [2; 3; 5].

**Висновки.** Сухопутна переорієнтація експорту після 2022 року змінила характер ризиків для швидкопсувних вантажів: визначальним став не кілометраж, а нестабільність транзитного часу на автомобільних ділянках, що збільшує частку простою у загальному циклі доставки, підвищує собівартість та знижує керованість температурного режиму. Рефрижераторні автомобілі залишаються необхідними для підвезення і розвезення, однак на довгих маршрутах їх ефективність зменшується через регламентовані обмеження роботи водіїв і високу енергоємність підтримання холоду під час затримок, що додатково посилює екологічні витрати перевезення.

Комбінована модель rail–road із використанням рефрижераторних контейнерів є більш стійкою для магістрального плеча, оскільки забезпечує стандартизовану вантажну одиницю з автономним холодом, мінімізує маніпуляції з продукцією на стиках, переносить критичні операції в термінальну інфраструктуру та зменшує залежність ланцюга від дорожніх «вузьких місць». Практична результативність цієї моделі визначається не самим фактом контейнеризації, а наявністю інфраструктури підключення та накопичення на терміналах, регулярністю інтермодальних сервісів, достатністю парку рефконтейнерів і дисципліною експлуатаційних процедур: попереднім охолодженням, передрейсовим контролем, безперервним моніторингом температури та регламентом дій на випадок затримок.

Перспективи розвитку на пряму пов'язані з нарощуванням прикордонних і тилових інтермодальних вузлів із гарантованим електроживленням для рефконтейнерів, стандартизацією сервісних параметрів інтермодальних перевезень (час обробки, слоти, порядок підтвердження режимів), масштабуванням регулярних контейнерних поїздів для температурно чутливих вантажів та впровадженням доказового цифрового контролю температури як обов'язкового елементу контрактної якості. Це дозволяє перейти від реактивного «гасіння» затримок до керованої логістики, де простій не руйнує холодний ланцюг і не формує непрогнозовані втрати.

#### Список літератури:

1. European Commission. Solidarity Lanes – key results (as of 18.12.2025). URL: [https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-september-2025-2025-10-27\\_en](https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-september-2025-2025-10-27_en) (дата звернення: 25.01.2026).
2. Delays of perishable goods at the border increased to 7 days. European Business Association. URL: <https://eba.com.ua/en/zatrymky-shvydkopsuvnyh-tovariv-na-kordoni-zbilshylys-do-7-dib/> (дата звернення: 25.01.2026).



3. Dmytriv D., Dmytriv O., Repak O., Michailyshyn B. Assessment of unprofitability of road transport of perishable goods in international traffic under the conditions of border blockade. *Galician Economic Journal*. 2024. № 2 (87). P. 84–92. DOI: [https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk\\_tntu2024.02.084](https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2024.02.084)
4. Driving time and rest periods in the road transport sector (Summary of Regulation (EC) No 561/2006). EUR-Lex. URL: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/driving-time-and-rest-periods-in-the-road-transport-sector.html> (дата звернення: 25.01.2026).
5. Robinson B. Diesel-powered fridge testing: Emissions from refrigerated vans and auxTRU. Zemo Partnership. 2024. URL: [https://www.zemo.org.uk/assets/reports/Refrigerated\\_Van\\_and\\_HGV\\_Auxiliary\\_Engines\\_Report\\_2024.pdf](https://www.zemo.org.uk/assets/reports/Refrigerated_Van_and_HGV_Auxiliary_Engines_Report_2024.pdf) (дата звернення: 25.01.2026).
6. Aung M. M., Chang Y. S. Temperature management for the quality assurance of a perishable food supply chain. *Food Control*. 2014. Vol. 40. DOI: 10.1016/j.foodcont.2013.11.016 (дата звернення: 25.01.2026).
7. CMA CGM Group. Reefer: Container Technical Brochures. URL: <https://www.cma-cgm.com/assets/public/documents/Container%20Technical%20Brochures.pdf> (дата звернення: 25.01.2026).
8. International agreement on the carriage of perishable foodstuffs and on the special equipment to be used for such carriage (ATP): information and documents. URL: [https://unece.org/DAM/trans/main/wp11/ATP\\_publication/ATP-2016e\\_def-web.pdf](https://unece.org/DAM/trans/main/wp11/ATP_publication/ATP-2016e_def-web.pdf) (дата звернення: 25.01.2026).
9. European Environment Agency. Rail and waterborne – best for low-carbon motorised transport. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/rail-and-waterborne-best-for-low-carbon-motorised-transport> (дата звернення: 25.01.2026).
10. Four facts about container train from Ukraine to Spain (Moving grain in boxes). UIRR. URL: <https://www.uirr.com/web-news/four-facts-about-container-train-ukraine-spain> (дата звернення: 25.01.2026).
11. Myronenko, V., Myronenko, V., Yurchenko, O., Vasilova, H. Multimodal Logistics Chains for international transportation of dangerous and Perishable Goods. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. Art. 03009. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439003009>

**Myroniuk I.I., Vasilova H.S., Goretskyi O.A., Yurchenko D.O. TRANSPORT AND OPERATIONAL SOLUTIONS FOR COLD CHAIN EXPORT OF UKRAINIAN PERISHABLE PRODUCTS TO THE EU**

*The article examines Ukraine's exports of perishable goods to EU countries under martial law, when after 2022 the main freight flows were rerouted to overland corridors and EU seaports. For temperature-sensitive cargo (meat and meat products, dairy products, fish, berries, fresh vegetables and fruits, frozen goods), the key constraint is not the nominal route distance but the variability of transit time and the growing share of idle time within the total delivery cycle. Peak border delays of up to seven days shift logistics from a scheduled to a stochastic regime, increasing costs of maintaining the cold chain during waiting periods, raising the probability of temperature deviations at critical points, and undermining delivery rhythm and contractual service predictability.*

*The methodological framework relies on a comparative analysis of two transport-technological configurations—road-only and combined rail–road—by identifying critical nodes of the cold chain (border crossing points, intermodal terminals, and modal interfaces) and assessing temperature-control manageability through power-supply options, procedural discipline, and control mechanisms. The study shows that refrigerated trucks remain indispensable for first/last mile operations; however, on long international hauls their performance is constrained by regulated drivers' working time and by increased energy and environmental burdens during idle periods, when autonomous refrigeration units operate for extended hours without transport productivity.*

*The paper substantiates the feasibility of using refrigerated containers as a standardized cold-chain loading unit for multimodal schemes with rail as the long-haul backbone and road transport for last-mile distribution. Containerization reduces product handling at interfaces, relocates critical operations to a terminal environment with access to grid power and controlled buffering, improves the reproducibility of temperature regimes, and decreases the cold chain's exposure to random road delays. Operational prerequisites for achieving these effects are specified, including pre-cooling, pre-trip inspection (PTI), continuous temperature monitoring, secured power supply (grid/genset), and a formalized delay-response plan.*

**Keywords:** cold chain, perishable cargo, freight transportation, export logistics, vehicle operation, combined transport, refrigerated transport, transport technologies.

Дата першого надходження статті до видання: 21.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Pavlova N.L.**<https://orcid.org/0000-0001-7528-2370>

Odesa National Maritime University

## INTERACTION MECHANISM OF TRANSPORT BUSINESS ENTITIES IN THE ORGANIZATION OF CARGO DELIVERY

*At the turn of the twentieth and twenty-first centuries, the neo-classical management theory emerged, within which advanced approaches to the governance of business entities in the manufacturing and service sectors, including transportation, were developed. Among these approaches are the Agile methodology and the Scrum framework, which serve as a methodological foundation for ensuring effective, coordinated management of the joint activities of such entities. This coordination is achieved through their interaction aimed at identifying manageable solutions that lead to the alignment and satisfaction of mutual business interests. This study examines the aforementioned approach in the context of ensuring effective interaction between freight forwarding companies and their stakeholders, namely cargo owners and transport enterprises. The paper identifies the prerequisites for the formation of a mechanism of interaction among transport business entities by substantiating an appropriate approach to addressing this issue. It is demonstrated that the logic underlying the development of such a mechanism should be based on viewing the aforementioned entities as components of an integrated system, in which freight forwarders act as providers of service offerings, while stakeholders function as consumers of these services. At the same time, freight forwarders perform an intermediary role between service consumers, and their mission consists in facilitating each stakeholder's attainment of the maximum possible benefit. An approach to the resolution of conflicting issues is substantiated through the generalization and synthesis of ideas, concepts, and theoretical provisions that constitute the components of the interaction mechanism among the participating entities. It is demonstrated that, as a result of the implementation of this approach, the competitive (confrontational) potential of the interacting entities is progressively transformed into cooperative relations, which fully corresponds to the essence of harmonizing the positions of the interacting parties while achieving the desired benefits for each of them. Methodological tools for harmonizing the business interests of stakeholders, as clients of freight forwarding companies, are developed using the example of determining compromise (contractual) performance indicators for cargo transshipment and ship handling processes.*

**Keywords:** cargo delivery, stakeholders, interaction, harmonization of business interests, negotiation process, compromise indicators.

**Formulation of the problem.** The development of modern management approaches in production and service sectors, including transport – such as transformation and flexible management concepts – has opened extensive opportunities to ensure effective coordination of joint activities among business entities, achieved through their business interaction.

This trend emphasizes the need to ensure objectivity in the negotiation process by generating mutually beneficial solutions, given the complex psychological challenge for each party to satisfy its interests without neglecting the counterparty's [1, 2].

At the current stage, research should focus on establishing a scientific foundation for managing transport business entities, i.e., stakeholders, which include enterprises of interrelated transport sectors

providing door-to-door cargo delivery, interacting with freight forwarding and agency companies.

This approach is justified by both the relevance of this research direction and prospects for digitalizing management processes of these enterprises. Attention is focused on finding ways to improve business interaction among these entities, as a key condition for their successful functioning and development.

The problem addressed in this work is to substantiate the main principles for creating an interaction mechanism between transport enterprises and cargo owners, as well as among themselves, to reconcile their business interests as participants in cargo delivery processes mediated by freight forwarding and agency companies.



**Analysis of recent research and publications.**

First of all, it should be noted that interaction as a component of the management process remains insufficiently studied, even in general terms. The initiation of research on interaction problems in the transport sector, in its modern understanding, is presented in studies [3 – 8]. In [3, 4], a comprehensive set of issues was examined regarding the development of a mechanism to ensure coordinated management of interacting transport systems, using the example of transport hub enterprises, with an in-depth consideration of aligning contractual time norms for processing railcars at port cargo fronts (terminal operators). In this approach, it is proposed to carry out the coordination procedure directly, i.e., without the involvement of intermediaries. The synthesis of scientific results presented in [3, 4] was further generalized in the dissertation research [5], which also considered the case of coordination in the “cargo owners–transport enterprises” system with the participation of a logistics operator as an intermediary structure.

In [6, 7], a targeted study of interaction as the main instrument of coordination was initiated, using transport hubs as examples, in a framework focused on forming partnership relations between enterprises during the organization and implementation of cargo handling processes without intermediary structures. This approach received significant development in [8] based on the latest concepts of agile transformation and flexible management [9, 10] in application to the problem of ensuring interaction between forwarding companies and transport process participants.

Thus, research on the organization of interaction among market actors in this direction is of considerable interest, and its further development is undoubtedly relevant both theoretically and practically.

**Task statement.** The study aims to perform an in-depth analysis of theoretical and methodological components of interaction in managing interconnected systems. To achieve this objective, the study addresses the following tasks:

- to substantiate the theoretical component of the interaction mechanism between enterprises and organizations operating in the transport business sector;
- to develop the methodological component of the aforementioned mechanism within the framework of addressing the task of harmonizing the business interests of the specified transport business entities.

**Outline of the main material of the study.** *Theoretical aspect of the study.* When considering the creation of a mechanism for the interaction of transport business entities, we proceed from the assumption

that this mechanism should ensure the gradual convergence of positions of the interacting entities to a situation where their business interests are satisfied. To this end, we take into account the results of studies on the problem of coordinating the management of cargo handling processes at transport hubs [3 – 5], the interaction of enterprises within transport hubs [6, 7], and the interaction of forwarding companies with participants in the transport process [8], in order to further develop the constructive ideas proposed in these works.

Thus, from the essence of the concept of interaction as a component of the management process, it follows that its implementation requires the aforementioned mechanism for converging positions of interacting entities to a state where their business interests are fulfilled. Solving such problems in a formal sense is achieved through the development and implementation of controlled decisions, while in a broader sense, it is achieved through management performed independently by each entity [8]. This implies that the approach to creating such a mechanism should be based on the principles of modern theory of coordination of management of interacting systems (hereinafter referred to as IS).

The proposed theory, as shown in [4], is based on the concepts of coordination and interaction as components of the management process. Coordination acts as a tool to combine IS and bring them into a certain alignment, while interaction serves as both a condition and a means for implementing coordination. It is important to emphasize that these concepts have a general methodological significance and play a key role in studies examining the logic of the “human factor”, particularly regarding the style of business behavior of market actors as they seek to maximize their interests.

Coordination and interaction in management are inextricably linked, which is clearly illustrated in market theory when exploring the relationship between demand, supply, and prices for goods and services [13]. This relationship is interpreted as a process of interaction in which relative prices are determined through mutual adjustment (coordination) of consumers and suppliers. Interaction, as the process of achieving coordination of IS, manifests in the form of facilitation or opposition [12]. Facilitation is realized through the development of unity, cohesion, and integrity, which then transforms into cooperative relationships, i.e., joint constructive activity. Conversely, opposition is based on the effect of confrontation, initiating competition, resulting in conflict of interests when both parties claim the same valuable resource.

Currently, in all sciences studying interaction, facilitation, and opposition of production-economic actors, cooperation receives the most attention. From this perspective, a science called “Partnership Interaction” has emerged, based on interaction theory, exchange, participation, understanding, and marketing of partnership relations. It demonstrates that joint activity of IS leads to success when principles such as autonomy and equality, mutual recognition and trust, interest in mutually beneficial solutions, readiness for constructive cooperation, and voluntary acceptance of responsibility in dispute resolution are observed.

It is worth noting that in this field, emphasis is traditionally placed on facilitation (cooperation), while opposition (competition) remains “in the shadows”, which contradicts the principles of market and mixed economies, where the coexistence of partnership and competitive relations is an objective reality. This necessitates ensuring a harmonious combination of the positive potential of both aspects as a condition for resolving conflicts through compromise, consensus, and agreement in discussions and dialogues.

A synthesis of the above ideas, concepts, and principles allows us to conclude that it is possible to create an effective mechanism for coordinating the management of any IS. In application to the tasks investigated in this study, such a mechanism is proposed in the form of an algorithm, whose concept was suggested in [4, 8]. The algorithm involves discussion, dialogue, and the achievement of compromise, consensus, and long-term agreement between IS during business communication.

The interaction of negotiating entities begins with discussion, during which each party initially prioritizes its own interests. Subsequently, the parties begin to seek a way out of this impasse by acknowledging the interests of the counterpart, thereby directing confrontation toward a constructive path. This tendency is maximized when communication takes the form of a dialogue, establishing a communicative space to compare and reconcile the conditions (interests) of the parties.

Through dialogue, IS achieve:

- compromise by reconciling situational cooperation conditions through mutual concessions;
- consensus by defining a mechanism for long-term interaction to ensure shared values;
- long-term agreement by adopting a common cooperation goal and identifying the individual benefit of each party.

From the described stages of business communication, it follows that initial relations are competitive, tending toward confrontation, while at the end

of discussions, competitive potential decreases, and elements of cooperation emerge. During dialogue and achievement of compromise or consensus, relationships are characterized by simultaneous cooperation and competitive behavior, whereas in the stage of long-term agreement, cooperation dominates, with competition appearing only in the form of idea contention for specific issues.

The proposed mechanism for achieving agreement among IS can be considered a universal methodological tool, suitable for solving any problems related to coordination, including establishing contractual performance indicators. For long-term agreements, all steps of the algorithm must be followed; for short-term operational intervals, only the stages of discussion, dialogue, and compromise are necessary.

This approach is fundamentally based on high moral qualities of participants, which should guide all entities in developing joint managerial decisions. Nevertheless, in a market-oriented environment where each participant seeks to maximize personal gain, subjective behavior and “market egoism” may appear. However, such behaviors can be neutralized with proper methodological support for coordination of controlled decisions, as discussed below.

It should be noted that traditional management theory considers interactions between IS without intermediaries. The opposite scenario is considered in [5, 8] for the case when relations between cargo owners (CO) and transport enterprises (TE) are mediated by forwarding companies (FC) acting as moderators of door-to-door delivery.

The role of FC is to coordinate positions, interests, conditions, requirements, and preferences of stakeholders in cargo transport and handling processes. FCs must act as “servants of two masters”, assisting COs in minimizing costs and TEs in maximizing revenues. This results in dual interaction scenarios: FC – CO and FC – TE, where the FC emulates the business behavior of TEs in the first case and COs in the second.

It is important to note that COs and TEs together form a system in cybernetic terms, alternating as either the controlling entity, generating influence on the counterpart, or the controlled entity, receiving influence. Their interaction occurs through reflexive management, where one party exerts psychological pressure to gain benefit.

Currently, two concepts of reflexive management exist. The first is chronological, where the initiator seeks personal gain by forcing the counterpart to make disadvantageous decisions – essentially manipulation under the principle “the end justifies the means.” In

contrast, the Odesa school of reflexive management defines it as a guiding influence where the controlled entity acts according to the goals of the controlling entity while satisfying its own interests, achieving mutually beneficial outcomes.

From this, it follows that the first approach allows only one-time interaction, whereas the second creates conditions for long-term cooperation and strengthened business relations. It is logical and appropriate to further develop the above-described IS interaction mechanism based on the Odesa school reflexive management concept, integrated with agile transformation principles [9], which emphasize values such as: individuals and interactions over processes and tools; collaboration between developer and customer over contract negotiation. Moreover, agile management requires dividing the product creation process into interrelated stages, evaluating results at each stage, and seeking ways to improve subsequent work, including the development of intellectual products.

*Methodological aspect of the study.* As noted above, to ensure objectivity in resolving the relationships of interacting business entities (IBE), an appropriate methodological toolkit is required. In this study, it is proposed to develop such a toolkit based on the concept of “potentially achievable benefit” (as opposed to lost benefit), and it is assumed that this toolkit should be an essential component of the management system of service organizations, particularly the aforementioned forwarding companies (FCs).

The essence of the service mission of these companies regarding the benefit of their stakeholders lies in identifying opportunities to determine sources of benefit in specific situations and conditions at each stage of cargo delivery. In each case, the FC faces the task of determining concrete sources of benefit, the range of its quantitative estimates, and recommendations for stakeholders.

The first component of this proposed task in the transport sector is related to a universal source of efficiency, including benefit, which consists in time savings during cargo delivery processes, their stages, and operations. Therefore, FCs, as guarantors of stakeholder interests, must constantly seek opportunities to achieve this goal through interaction with each participant in the cargo delivery process.

The second component requires considering that the potential benefit, in quantitative terms, corresponds to the difference between the theoretically possible maximum revenue and the associated costs of implementing the proposed project. Its minimum value should be equated to the acceptable level of this indicator for the concerned stakeholder.

Finally, the third component of the task involves presenting the essence of the proposed FC project, justifying the amount of benefit from its implementation for each stakeholder, and determining the methodology for aligning the interests of the interacting parties.

Next, we describe the methodology for solving this task using the example of establishing contractual indicators for the vessel handling process (VHP), where the interacting parties are ports or port terminal operators (PTOs) on one side, and shipowners or charterers (S/C) on the other, with FCs mediating. The procedure for agreeing on these indicators is carried out through discussion, dialogue, and reaching compromise using the Scrum methodology.

It should be noted in advance that the use of contractual VHP indicators is directly related to solving the problem of systemic optimization of port production, particularly in determining the most advantageous sequence of vessel handling from the PTO's perspective. Typically, such situations arise when S/C faces the risk of violating cancellation deadlines or when a PTO needs (or finds it advantageous) to free a berth for another vessel. Clearly, in both cases, the handling intensity of the vessel must be increased.

Consider the following natural conditions:

- for the PTO, the costs of handling the vessel accepted for service increase due to reduced labor productivity (increase in labor intensity of cargo operations) caused by a higher concentration of labor resources on the vessel. At the same time, PTOs may incur losses in the form of fines for untimely handling of the cargo source from which labor resources are withdrawn.

- for the S/C, conversely, berth costs are reduced due to savings in port stay time.

Thus, in organizing accelerated vessel handling, the S/C always benefits, whereas the PTO only benefits if the increase in handling and related costs is compensated by the S/C through an agreed surcharge.

The procedure can be implemented using the idea of raising the standard dispatch rate, where the dispatch rule applies according to the postulate of “good maritime practice” and equals half the demurrage rate.

Let us consider the methodological aspect of performing this procedure by solving an appropriate task, starting with determining the contractual dispatch rate according to the postulates of “Good Maritime Practice,” one of which stipulates that the standard dispatch rate should be half the demurrage rate, which in turn equals the vessel's daily port stay costs.

Consequently, the contractual dispatch rate should meet the following conditions:

- for PTOs, it must exceed the standard dispatch rate plus the specific value of increased handling costs and potential losses at the cargo source.
- for S/C, it must not exceed the vessel's daily port stay costs.

The formulated task is solved as shown in [14] using the following scheme:

- the initial data for determining the dispatch rate ( $d$ ) are fixed, namely:
  - increase in PTO handling costs ( $\Delta R_n = R_n - R_n^0$ );
  - possible PTO expenses ( $F_n$ );
  - possible PTO losses ( $F$ );
  - ship daily berth costs ( $S_c$ );
  - proposed S/C vessel handling time ( $T$ );
  - demurrage rate ( $d_m = S_c$ );
  - standard dispatch rate ( $d_c = 0,5d_m = 0,5S_c$ );
  - minimum dispatch rate from PTO's perspective ( $d_{\min} = 0,5S_c + (\Delta R_n + F_n) / T$ );
  - maximum dispatch rate from S/C's perspective ( $d_{\max} = S_c$ ).

It seems clear that the sought contractual dispatch rate exists within a certain range, from its minimum to maximum values ( $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ ). Consequently, this indicator can formally be considered a random variable, with its most probable value shifted to the right, i.e., toward the maximum value if the shipowner is interested in accelerating vessel handling, or to the left when the initiator of the indicator under consideration is the port/terminal operator (PTO) [4].

Given that the values of this indicator are limited by a finite interval, and assuming that their distribution follows the law of random variables, the level of the contractual dispatch rate is determined in the first case by the formula:

$$d = \frac{3d_{\max} + 2d_{\min}}{5}, \quad (1)$$

and in the second case, the level of the contractual dispatch rate is determined by the formula:

$$d = \frac{2d_{\max} + 3d_{\min}}{5}. \quad (2)$$

In practice, several scenarios may arise for the PTO:

- a) No increase in handling costs (labor productivity does not decrease regardless of labor resources), but losses occur;
- b) Increased handling costs exist, but no losses occur (additional labor resources are drawn from reserve);
- c) No increase in costs or losses occurs.

These situations require an adequate modification of the formulas for calculating the minimum dispatch rate, corresponding to scenarios a) – c) takes the form:

$$d_{\min} = \begin{cases} 0,5S_c + F_n / T; \\ 0,5S_c + \Delta R_n / T; \\ 0,5S_c. \end{cases} \quad (3)$$

In scenario c), formulas (1) and (2) for calculating the contractual dispatch rate take the form:  $d = 0,8S_c$ ,  $d = 0,7S_c$ .

The described methodology can also be applied with minor modifications when the dispatch rule is not in effect. In such a case, instead of the dispatch rate, a “bonus” can be introduced, which the S/C pays to incentivize PTOs for early vessel handling. Clearly, the maximum bonus ( $b_{\max}$ ) should not exceed the vessel's daily port stay costs, while the minimum bonus ( $b_{\min}$ ) should equal half of these costs. The bonus level ( $b$ ) will then fall within the interval ( $b_{\min} \leq b \leq b_{\max}$ ), determined analogously to formulas (1) and (2), as shown in formulas:

$$b = \frac{3b_{\max} + 2b_{\min}}{5}; \quad (4)$$

$$b = \frac{2b_{\max} + 3b_{\min}}{5}. \quad (5)$$

In scenario c), the bonus is calculated as  $b = 0,8S_c$ ,  $b = 0,7S_c$ .

Similarly, the methodology for establishing the contractual cargo operation norm during vessel handling is created. It is based on the conditions that the contractual norm exceeds the charter norm by a certain value, and that the PTO receives a bonus from the S/C or FC for increasing loading/unloading intensity. The essence of the task is to determine the specific value of the bonus.

It is evident that the same methodology can be used to calculate the bonus that the S/C pays to the PTO for saved berth time when the dispatch rule does not apply, using the formulas:  $b = 0,8S_c$ ,  $b = 0,7S_c$ .

Finally, the issue of a contractual piece-rate for cargo handling can be discussed contractually, usually initiated by the FC due to the need to accelerate vessel handling. This task is solved by establishing a surcharge to the piece-rate, using the methodology for determining the contractual loading/unloading norm, with the indicator “bonus” replaced by “surcharge.”

**Conclusions.** The results of the conducted study consist of the elaboration of a set of theoretical and methodological issues concerning the implementation of interaction between enterprises and organi-

zations in the transport sector during the process of cargo delivery from consignors to recipients.

In the theoretical part of the study, the following results were obtained: the prerequisites for creating a mechanism for the interaction of transport business entities were identified in terms of substantiating the approach to solving this problem:

it was shown that this mechanism should comply with the constructive ideas of modern management sciences and with tools such as coordination, interaction, cooperation, competition, harmonization of conditions, agile transformation, agile management, and reflexive management;

an algorithm for achieving compromise, consensus, and long-term agreement among interacting entities was developed, with a description of the content of the steps (stages) of its operations, which allows understanding the logic of the business behavior of participants in the contractual process;

it was demonstrated that, depending on the time horizon, the algorithm is implemented differently – for long-term periods, all steps are carried out, while

for short-term intervals, it is sufficient to consider only the stages of discussion, dialogue, and reaching a compromise;

the conditions for practical implementation of the mechanism for harmonizing controlled decisions were identified by developing an appropriate methodological toolkit for the stages of dialogue and achieving compromise, consensus, and long-term agreement.

In the methodological part of the study, methods were developed for determining the levels of contractual indicators of the ship handling process (SHP), namely – the dispatch rate, the cargo loading/unloading norms, and the piecework rate for cargo handling in a probabilistic formulation.

The next stage of research on the topic of this study should be associated with the development of the interaction algorithm in multi-entity systems in both substantive and formal senses, as well as the development of computer technologies for solving tasks related to determining contractual indicators of the transport process in a remote setting.

#### Bibliography:

1. Симченко Н.О., Аблялілов Е.Р., Чачуа Ю.О. Сучасні підходи до узгодження інтересів підприємства зі суб'єктами господарювання. *Ефективна економіка*. 2012. № 4. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1073>
2. Левицький А. Узгодження інтересів зацікавлених сторін при реалізації соціальних проєктів. *Актуальні проблеми державного управління*. 2013. Вип. 2 (54). С. 77–80.
3. Мурад'ян А.О. Основи формування механізму узгодженого управління вантажоперевалювальним процесом у поняттях маркетингу. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2015. Вип. 2(44). С. 154–165
4. Магамадов О.Р. Мурад'ян А.О. Обґрунтування підходу до розробки механізму забезпечення узгодженого управління взаємодіючими транспортними системами. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2017. Вип. 2(59). С. 5–20
5. Мурад'ян А.О. Методичні основи узгодженого управління процесом перевалки вантажів у загально-транспортних вузлах : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 – транспортні системи / Одеський національний морський університет. Одеса, 2016.
6. Павлова Н.Л. Концептуальні основи імітаційного моделювання процесу взаємодії суміжних підприємств транспортного вузла (звіт про НДР заключний) – № державної реєстрації 0112U004303. Одеса : ОНМУ, 2017. Розділ 4.3.
7. Павлова Н.Л. Особливості формування партнерських відносин між учасниками виробничого процесу морського транспортного вузла (звіт про НДР проміжний) – № державної реєстрації 0112U004303. Одеса : ОНМУ, 2016. Розділ 14.
8. Павлова Н.Л. Теоретико-методичні основи механізму взаємодії транспортно-експедиторських компаній зі стейкхолдерами. Зб. тез доповідей наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів. Київ, 2025. Вип. 81. С. 364–365
9. Conforto E., Salum F., Amaral D. et al. Can Agile Project Management Be Adopted by Industries Other than Software Development? *Project Management Journal*. 2014. Vol. 45, No 3. P. 21–34.
10. Agile project management with Scrum. URL: <https://www.pmi.org/learning/library/agile-project-management-scrum-6269>
11. Кириллова О.В., Магамадов О.Р., Кириллова В.Ю., Павлова Н.Л., Шурін Б.В. Теоретико-методичне обґрунтування механізму оперативного управління процесом обробки судна. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2023. Вип. 2(69). 105–123. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-2-105-123>



12. Громова О.Є. Роль координаційної функції в процесі управління організацією. *Економіка і суспільство*. 2016. Вип. 7. С. 256–259.
13. Темненко С.М. Поняття ринку в економічній теорії. *Науково-технічний бюлетень*. 2020. Випуск 1 (21). С. 222–227.
14. Кириллова О.В., Павлова Н.Л., Магамадов О.Р., Кириллова В.Ю., Мурад'ян А.О. Теоретико-методичні основи визначення договірних показників обробки суден. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2024. № 3 (74). С. 138–152. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2024-3-139-120>

## Павлова Н.Л. МЕХАНІЗМ ВЗАЄМОДІЇ СУБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТНОГО БІЗНЕСУ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ

На рубежі ХХ-ХХІ століть відбулося становлення неокласичної теорії управління, у складі якої сформувалися новітні підходи до керівництва суб'єктами бізнес-діяльності у виробничій та сервісній галузях, зокрема на транспорті. До таких підходів належить зарахувати концепції agile-методології та scgit-методики як методологічної основи забезпечення ефективного узгодженого управління сумісною діяльністю згаданих суб'єктів, що досягається у процесі їх взаємодії з метою пошуку керованих рішень, які ведуть до задоволення взаємних ділових інтересів. Зазначений підхід досліджується в даній роботі стосовно забезпечення ефективної взаємодії транспортно-експедиторських компаній зі стейкхолдерами, тобто з вантажовласниками й транспортними підприємствами. В роботі визначено передумови створення механізму взаємодії суб'єктів транспортного бізнесу сенсі обґрунтування підходу до вирішення цієї проблеми. Показано, що логіку створення зазначеного механізму належить ґрунтувати на розгляді згаданих суб'єктів у складі єдиної системи, в якій експедитори виступають як виробники сервісних послуг, а стейкхолдери – як споживачі цих послуг. При цьому експедитори грають роль посередників між споживачами їх послуг, а їх місія полягає у сприянні кожному стейкхолдеру у досягненні максимально можливої вигоди. Обґрунтовано шляхом узагальнення ідей, понять, концепцій перерахованих вище складових механізму взаємодії контактуючих суб'єктів підхід до вирішення суперечливих питань. Доведено, що в результаті реалізації цього підходу конкурентний (конфронтаційний) потенціал контактуючих суб'єктів трансформується послідовно у відносини співробітництва, що цілком відповідає сенсу узгодження позицій контактуючих суб'єктів з досягненням бажаної вигоди для кожної з них. Розроблено методичний інструментарій узгодження ділових інтересів стейкхолдерів як клієнтури транспортно-експедиторських компаній на прикладі визначення компромісних (договірних) показників процесів перевалювання вантажів та обробки суден. Отримані результати створюють основу для ефективної організації та управління договірним процесом у транспортному бізнесі.

**Ключові слова:** доставка вантажів, стейкхолдери, взаємодія, узгодження бізнес-інтересів, переговорний процес, компромісні показники.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Сільванська Г.М.**

<https://orcid.org/0000-0002-1272-8029>

Одеський національний морський університет

## ГЛОБАЛЬНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СВІТОВОГО РИНКУ ЯХТИНГУ – СЦЕНАРНИЙ ТА КЛАСТЕРНИЙ ПІДХІД

*У дослідженні розглянуто глобальні тенденції розвитку ринку яхтингу у 2022–2032 роках із застосуванням сценарного моделювання та кластерного аналізу. Використання методу CAGR дозволило визначити стійку траєкторію зростання від 11,04 млрд дол. США у 2022 році до 20,62 млрд дол. США у 2032 році при середньорічному темпі 6,7%. Сценарний аналіз окреслює три можливі траєкторії – базову, оптимістичну та песимістичну – зумовлені технологічними інноваціями, екологічними регуляціями та макроекономічними умовами. Кластерний аналіз виявляє структурну взаємозалежність економічних і ринкових факторів, технологічних та екологічних драйверів.*

*Підхід забезпечує методологічну основу для стратегічного планування, інвестиційних рішень та формування політики сталого розвитку у сфері морських перевезень і туризму.*

*Особлива увага приділяється регіональним аспектам розвитку яхтового туризму в Середземномор'ї, де Греція, Італія та Хорватія демонструють різні моделі функціонування ринку: від преміального сегмента до доступного масового туризму.*

*Актуальність проблеми полягає в тому, що яхтинг як форма пасажирських перевезень, перетворюється на масовий формат перевезень, перестас бути лише елітним сегментом і де екологічність, інновації та доступність стають визначальними факторами майбутнього розвитку.*

*Практичне значення полягає у тому, що результати можуть бути використані інвесторами та компаніями для оцінки перспектив ринку і прийняття рішень щодо розвитку чартерного бізнесу та інфраструктури. Практики яхтової індустрії (марини, чартерні компанії, клуби) отримують аналітичну основу для оптимізації бізнес-моделей та адаптації до глобальних викликів.*

*Державні та регіональні органи влади отримують інструмент для формування політики сталого розвитку, враховуючи екологічні та соціальні фактори*

**Ключові слова:** світовий ринок яхтингу, сценарний аналіз, кластерний підхід, CAGR (Compound Annual Growth Rate), екологічні технології, сталий розвиток, Середземноморський регіон, чартерний бізнес.

**Постановка проблеми.** Світовий ринок яхтингу у 2022–2032 р.р. демонструє стійку тенденцію зростання, проте його розвиток відбувається в умовах багатфакторного впливу та високої невизначеності. Традиційні підходи до аналізу ринку, що ґрунтуються переважно на економічних показниках, не враховують комплексної взаємодії технологічних, екологічних та соціально-культурних чинників. Це призводить до обмеженості прогнозів та ускладнює прийняття стратегічних рішень для інвесторів, компаній і державної політики.

Особливої актуальності набуває питання інтеграції регіональних моделей розвитку яхтового туризму (Греція, Італія, Хорватія) у глобальні тенденції, а також визначення потенціалу

України, зокрема Одеси, як перспективного центру яхтингу. Відсутність системного сценарного та кластерного аналізу у дослідженнях ринку створює наукову прогалину, що потребує заповнення.

Таким чином, проблема полягає у необхідності розробки методології, яка б поєднувала сценарний підхід та кластерний аналіз, дозволяючи комплексно оцінити фактори розвитку, побудувати альтернативні траєкторії та сформувати практичні рекомендації для сталого розвитку ринку яхтингу. Представлено комплексне дослідження глобальних тенденцій розвитку світового ринку яхтингу у 2022–2032 роках, із застосуванням сценарного та кластерного аналізу, а також методів екстраполяції трендів (CAGR).



Основні напрямки дослідження:

- Виявити ключові фактори впливу (економічні, технологічні, екологічні, соціальні та ринкові), що визначають динаміку розвитку яхтового туризму.

- Побудувати сценарії розвитку (базовий, оптимістичний, песимістичний) для оцінки можливих траєкторій галузі.

- Здійснити кількісне прогнозування обсягів ринку на основі CAGR та статистичних даних.

- Оцінити регіональні особливості розвитку яхтового туризму, зокрема в Середземномор'ї (Греція, Італія, Хорватія) та потенціал України.

- Сформувати практичні рекомендації для інвесторів, компаній, державних і регіональних органів влади щодо стратегічного планування та політики сталого розвитку.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Останні публікації (2023–2025р.р) про морський та яхтовий туризм концентруються навколо відновлення попиту після пандемії, переходу до екологічних технологій, цифровізації сервісів і регіональних відмінностей у пропозиції чартерів[1]. У загальному туристичному контексті акцент зроблено на потребі стандартизованої статистики та індикаторів для стійкого управління галуззю, а також на відновленні міжнародного туризму та впливі кризових чинників (економічних, геополітичних) на динаміку попиту.

Тематичні напрями 2023–2025рр. показують відновлення та нову структуру попиту: перехід від володіння до оренди, зростання частки сімейного та активного відпочинку; у широкому туристичному полі підтверджено тренд на поступове відновлення та потребу враховувати бар'єри довіри й безпеки. Для розвитку галузі яхтингу потребуються –екологічність середовища і технології: впровадження електро/гібридних установок, енергобаз менеджменту, «смарт-яхт»; технологічний розрив між анонсами і фактом введення суден у експлуатацію лишається предметом критики та перегляду практик; цифровізація ринку як драйвер розвитку- платформи бронювання, аналітика попиту, конджойнт та поведінкові методи для оціни пропозицій [9,10].

Регіональна специфіка Середземномор'я як вузла масових чартерів у національному вимірі, потребує досліджень які підкреслюють необхідність інтеграції у міжнародні стандарти статистики для політики та маркетингу.

Огляд бази джерел та методів дослідження.

У дослідженні ринку яхтингу як форми пасажирських перевезень та яхтового туризму вико-

ристано комплекс джерел, які можна умовно поділити на три групи:

1. Українські фахові видання які забезпечують національний контекст, демонструють інтеграцію яхтового туризму у транспортну та економічну політику України, підтверджують актуальність теми для регіональних досліджень транспортно-технологічних пасажирських систем(Одеса, Миколаїв)[1, с. 117-133, 2, с. 203, 3].

2. Міжнародні наукові статті які містять прикладні методи аналізу, актуальні статистичні дані, прогнози та огляди інновацій, що формують практичну основу для сценарного та кластерного аналізу [4]. Конджойнт-аналіз [4] – дозволяє визначити найбільш значущі для споживачів показники яхтового туризму: маршрут і дестинація, рівень сервісу, екологічність яхти, ціновий діапазон. Статистичний аналіз та опитування [5,6] – застосовані для оцінки попиту, культурних і маркетингових чинників.

3. Аналітичні звіти галузевих організацій – забезпечують зіставлення академічних висновків із реальними тенденціями ринку, включаючи дані про інфраструктуру, чартерний флот та інноваційні практики [7,8].Джерела [9,10] це комплексні методи – аналіз/синтез, порівняння, економіко-статистичні та графічні, які можуть бути перенесені на сегмент яхтингу для системних рішень.

Представлена робота охоплює увесь ринок яхтингу, включаючи також його масовий сегмент, а не лише сегмент преміум, та робить акцент на економічних та екологічних факторах [7],в цьому «охваті» і полягає відмінність даної роботи.

Ключові висновки з суміжних досліджень літературних джерел :

- Відновлення туризму супроводжується структурними зсувами: більш короткі подорожі, екологічні практики, що накладається на яхтовий сегмент (чартери, «зелена» інфраструктура марин) [8].

- Необхідність якісних даних для регіональних прогнозів і маркетингу. Рекомендовано розвивати національні системи статистики та аналітики відповідно до міжнародних рекомендацій (ООН), що релевантне для аналізу яхтового ринку [9,10].

У фокусі методології вітчизняних праць, про оцінку стану яхтового туризму, підкреслено комплекс методів (аналіз/синтез, порівняння, економіко-статистичні, графічні), які можуть бути перенесені на сегмент яхтингу для системних рішень. Використані методи аналізу дозволяють глибше зрозуміти мотивацію обсягів пасажирських перевезень та формувати цільові пропозиції [10, с. 100-113].

Прогаляни у науковій базі досліджень, це:

- Відсутність узгоджених національних показників для яхтового сегмента [10].
- Недостатньо коректна система оцінок внеску окремих кластерів (економіка, технології, екологія) у темп зростання ринку Бракує досліджень зв'язуючи технології з економікою (лаг між інноваціями на суперяхтах та їх дифузії у сегмент до 20 м) [11].
- Відсутня схема та алгоритм порівняння моделей регіональних сценаріїв розвитку для Середземномор'я (Італія, Греція, Хорватія) [10–12].

Джерела [6,7] мають прикладне значення, оскільки містять актуальні статистичні дані, прогнози та огляди інновацій. Вони забезпечують практичну основу для сценарного та кластерного аналізу, а також дозволяють зіставити академічні висновки з реальними тенденціями ринку. Таким чином, використані джерела створюють баланс між академічною теорією та практичною аналітикою, що робить дослідження комплексним і методологічно обґрунтованим.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка науково обґрунтовану методології оцінки глобальних тенденцій розвитку ринку яхтингу у 2022–2032 р.р., шляхом поєднання сценарного моделювання та кластерного аналізу. Мета – виявлення ключових факторів впливу на еволюцію ринку яхтигну, побудова альтернативних траєкторій розвитку та визначення потенціалу інтеграції України (на прикладі Одеси) у міжнародні логістичні та транспортні процеси.

Нами була сформована база даних на основі статистики CLIA [1]. Вона вмістила 400 суден з різних вище маніфестованих світових регіонів. Використано методи Сценарний аналізу для побудови сценаріїв розвитку.

Усі висновки зроблено засобами програмного забезпечення IBM SPSS Statistics [9,10]. Сформульовано основні напрямки еволюції круїзів, представлені тенденції по напрямкам. Представлено результати на (рис 4):

1. Побудова трьох сценаріїв (базовий, оптимістичний, песимістичний).

При аналізі сценаріїв, бачимо вплив різних траєкторій розвитку залежно від економічних, технологічних та екологічних факторів. Результат дає змогу оцінити діапазон можливого майбутнього.

2. Кластерний підхід (рис. 6,7,8)

Дає можливість виділення ключових груп факторів: економіка, технології, екологія, соціальні фактори. Також:

– Оцінити їх сили впливу на динаміку зростання (2022–2032рр.).

– Визначення домінуючих драйверів.

3. Зроблено екстраполяцію трендів (CAGR).

– Використати показник Compound Annual Growth Rate (6,7%) для базового сценарію.

– Розрахувати прогнозні значення на основі історичних даних і темпів зростання яхтингового ринку.

– Дас кількісну основу для побудови графіків. Лінійні графіки для сценаріїв та кластерів. Порівняння траєкторій у часі. Підсилює аналітичний ефект і робить висновки наочними.

Використані методи поєднують кількісну основу (екстраполяція, CAGR) та якісний аналіз (сценарії, кластери). Це дозволяє не лише прогнозувати цифри, а й зрозуміти, які фактори реально формують майбутнє ринку.

**Виклад основного матеріалу.** Світовий ринок яхтингу: зростає з \$11,04 млрд у 2022 році до \$20,62 млрд у 2032 році. Це майже подвоєння за десятиліття при середньому річному темпі зростання 6,7% (CAGR). Лінія показує рівномірну траєкторію, що підтверджує стабільність галузі. Світовий ринок яхтингу демонструє стійке зростання: від \$11,04 млрд у 2022 році до \$20,62 млрд у 2032році.(рис. 1).

Середній річний темп зростання (CAGR) становить 6,7%, що підтверджує стабільність галузі та її інвестиційну привабливість.

Зростання ринку яхтингу обумовлене кількома факторами:

– збільшенням попиту на чартерні яхти як альтернативу володінню;

– інтеграцією яхтингу у сферу туризму, спорту та оздоровлення;

– поширенням екологічних технологій та цифрових сервісів.

Світовий ринок яхтингу перебуває у фазі стійкого зростання. За прогнозами, його обсяг зросте до \$20,62 млрд у 2032-му, що означає майже подвоєння за десятиліття. Середній річний темп зростання (CAGR) як означено вище, підтверджує стабільність галузі та її інвестиційну привабливість. Світовий ринок яхтингу сьогодні перебуває у фазі стійкого зростання, що підтверджується прогнозами майже подвоєння його обсягів до 2032 року. Це робить тему дослідження актуальною з кількох причин (рис 1):

Глобальні тенденції це:

– Зростання попиту на чартерні яхти як доступну альтернативу володінню.

– Інтеграція яхтингу у сферу туризму, спорту та оздоровлення після пандемії.

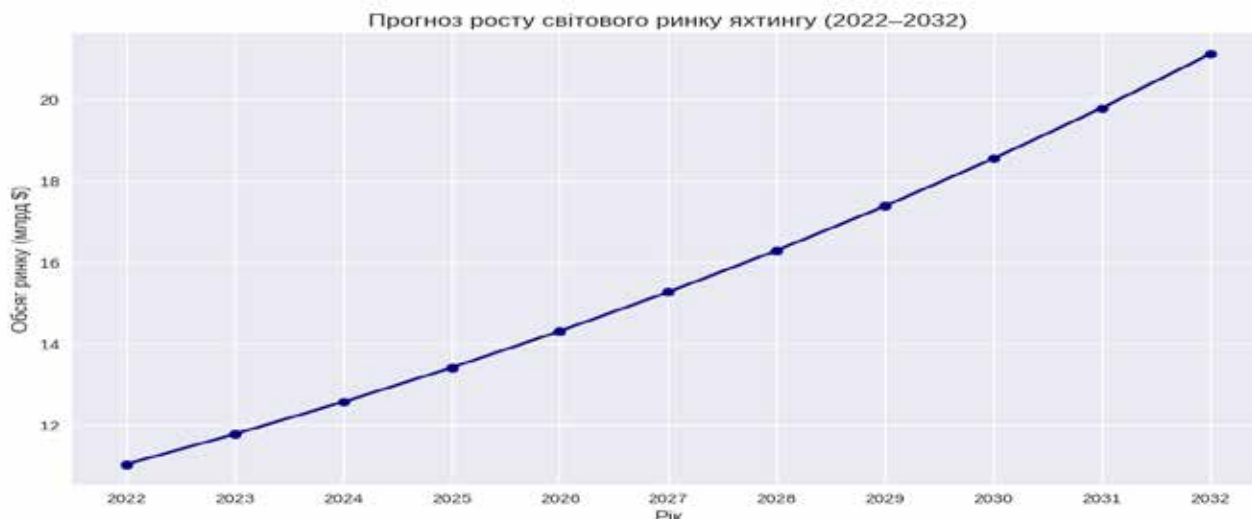


Рис. 1. Прогноз росту ринку яхтингу 2022–2032 рр.

– Розширення географії ринку – від Середземномор'я до Карибів та Азії.

Технологічні виклики які стоять перед означеним сегментом Середземномор'я це:

– Перехід до екологічних технологій: електродвигуни, сонячні панелі, системи очищення води.

– Поява «смарт-яхт» із цифровими сервісами та автоматизацією.

– Відставання частини індустрії від темпів розвитку технологій, що потребує адаптації.

Екологічні та регуляторні фактори впливу на сегмент:

– Посилення вимог до зниження викидів і охорони морських екосистем.

– Попит на «зелений туризм» як новий стандарт у відпочинку.

Регіональний аспект:

– Середземномор'я залишається ключовим центром яхтового туризму, але конкуренція між країнами (Греція, Італія, Хорватія) формує різні моделі розвитку.

– Україна має потенціал інтегруватися у світові тенденції через розвиток інфраструктури в Одесі та інших портових містах.

**Ключові напрямки.** Середземномор'я – це статистично найбільший та найдинамічніший регіон яхтингу, який поєднує культурну спадщину, природну красу та сучасну інфраструктуру. Воно залишається беззаперечним лідером у світовому яхтовому туризмі[8]. Протяжність Середземного моря – близько 3700 км, воно охоплює узбережжя 21–22 держав Європи, Африки та Азії. У складі Середземного моря – понад 12 окремих

морів (Егейське, Адріатичне, Іонічне, Тірренське тощо) та тисячі островів, що створюють величезну кількість маршрутів. Найпопулярніші країни для яхтингу це: Італія, Іспанія, Франція, Греція, Хорватія, Туреччина, Кіпр, Чорногорія. Високий сезон триває з червня по серпень, коли погода тепла й суха, а вода ідеальна для купання та дайвінгу.

Одним із ключових напрямків регіону є Італія, де яхтинг розвивається навколо таких знакових локацій, як Сардинія, Сицилія, Амальфійське узбережжя та Тоскана. Лише на Сардинії доступно понад три сотні чартерних яхт і функціонує більше п'ятнадцяти марин. Італійські маршрути поєднують культурну насиченість із атмосферою розкішних курортів, тому оренда великих яхт у сезон може сягати 80–300 тисяч євро на тиждень, що формує престижний імідж цього напрямку.

Греція пропонує інший характер яхтингу – більш розгалужений і острівний. Афіни, Лефкада та Егейський архіпелаг є головними стартовими точками для чартерів, а лише в Афінах доступно понад шістьсот яхт. Грецькі марини, хоч і менш численні, здатні приймати великі обсяги флоту. Вартість оренди тут значно варіюється: від 2–10 тисяч євро для середніх яхт до понад 200 тисяч для суден преміум-класу. Греція приваблює туристів ідеальними умовами для маршруту «острів за островом», численними бухтами та сприятливим вітром протягом сезону.

Хорватія традиційно вважається одним із найкомфортніших та найдемократичніших напрямків Адріатики. Спліт, Дубровник і Корнати форму-

ють основу чартерного ринку країни, де у Спліті доступно понад дві сотні яхт і працює щонайменше шість великих марин. Вартість оренди в Хорватії помітно нижча, ніж в Італії чи Греції: типові ціни для невеликих яхт становлять 1200–5000 євро на тиждень. Чисте Адріатичне море, численні острови та історичні міста роблять Хорватію одним із найпопулярніших напрямків для сімейного та активного яхтингу.

У підсумку Середземне море формує єдиний, але надзвичайно різноманітний яхтовий простір, де кожна країна має власну спеціалізацію: Італія – преміальний стиль і культурна насиченість, Греція – маршрутна свобода й острівні ландшафти, Хорватія – доступність і природна чистота Адріатики. Саме ця різноманітність забезпечує стійке зростання попиту на яхтовий туризм у регіоні.

Глобальний ринок яхтингу по пасажирським перевезенням:

- 2022 рік – \$11,04 млрд
- 2032 рік (прогноз) – \$20,62 млрд
- Середній річний темп зростання (CAGR) – 6,7%

Середземномор'я – найбільший регіон чартерів, де попит стабільно зростає щороку, особливо в Італії, Греції та Хорватії.

Туристичний потік Середземномор'я приваблює мільйони яхтових туристів щороку, особливо з Європи, де регіон доступний для коротких подорожей.

Французька та Італійська Рив'єри, Канни, Монако, а також узбережжя Хорватії та Греції – топові напрямки для чартерів. Попит на чартерні яхти постійно зростає, що робить регіон одним із найбільш комерційно успішних у світі.

Економічний аспект охоплює:

– Середземне море – головний центр світового яхтового бізнесу, де зосереджені найбільші чартерні компанії та марини.

– Ринок яхтового туризму в регіоні оцінюється у мільярди доларів щорічно, і він продовжує зростати завдяки розвитку інфраструктури та екологічних технологій.

Порівняльна статистику по країнах Середземномор'я (наприклад, Італія, Хорватія, Греція) з даними про кількість марин, чартерних компаній та середні ціни (рис. 2).

Загальна статистика по аналізу регіона:

– У Середземному морі доступно понад 700 яхт для чартеру лише через великі компанії, що охоплюють Італію, Грецію, Хорватію, Іспанію та Туреччину.

– Сезон триває з травня по жовтень, з піком у липні–серпні.

– Середня вартість оренди яхти коливається від €12 000 на тиждень для невеликих суден до €300 000+ на тиждень для суперяхт.

Італія:

– Основні регіони: Сардинія, Сицилія, Амальфі, Тоскана, 337 яхт у чартері на Сардинії та понад 15 марин.

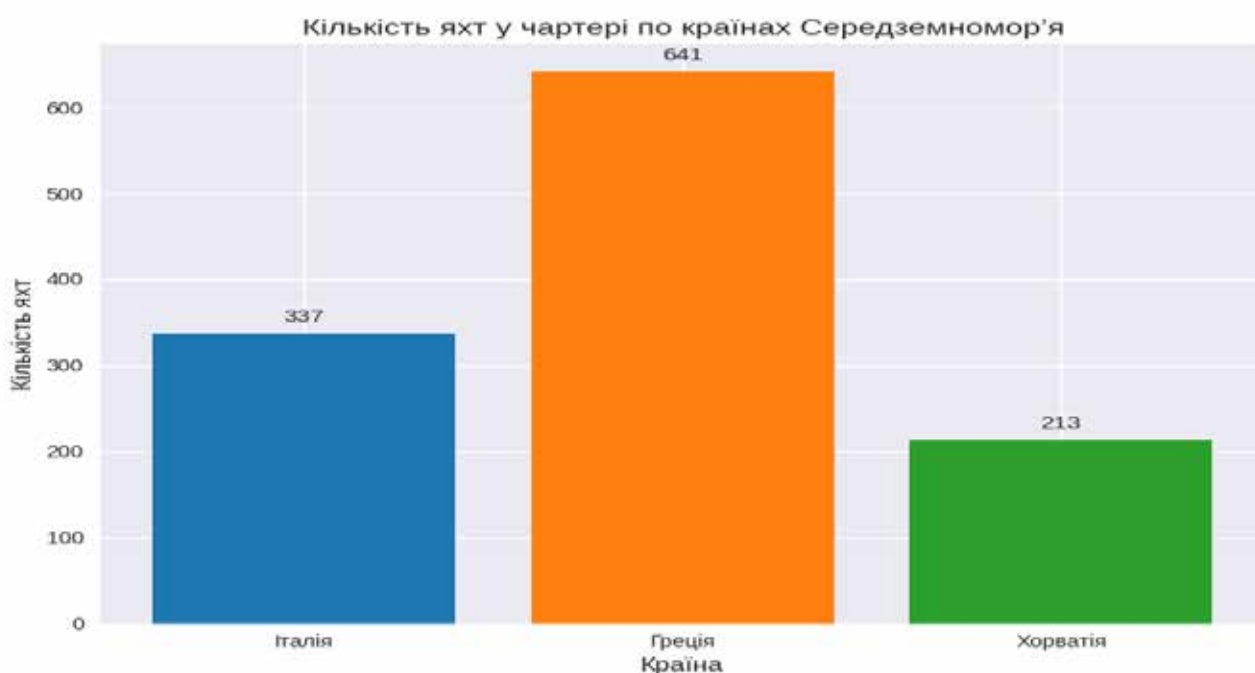


Рис. 2. Кількість яхт у чартері Середземномор'я

– Ціни: від €80 000–300 000 на тиждень для великих яхт.

– Популярність: поєднання культурних пам'яток і розкішних курортів.

Греція:

– Основні регіони: Афіни, Лефкада, Егейські острови, 641 яхта доступна в Афінах, понад 4 великі марины.

– Ціни: від €2 000–10 000 на тиждень для середніх яхт, до €200 000+ для люксових.

– Популярність: тисячі островів, ідеальні умови для маршруту «острів за островом».

Хорватія:

– Основні регіони: Спліт, Дубровник, Корнати, 213 яхт у чартері в Спліті, понад 6 марин.

– Ціни: від €1 200–5 000 на тиждень для великих яхт, середній сегмент доступніший за Італію та Грецію.

– Популярність: чисте Адріатичне море, історичні міста та відносно низькі ціни. Порівняння секцій (рис. 2):

– Греція – абсолютний лідер за кількістю яхт у чартері 641, завдяки великій кількості островів та розвиненій інфраструктурі.

– Італія – близько 337 яхт, сильна позиція у преміальному сегменті (Сардинія, Сицилія, Амальфі).

– Хорватія – 213 яхт, менший флот, але високий попит завдяки доступним цінам і чистому Адріатичному морю (рис. 2).

Конкуренція між країнами формує різні моделі розвитку підсекцій:

– Греція – масовий сегмент із широкою доступністю;

– Італія – преміальний сегмент із високою доданою вартістю;

– Хорватія – демократичний сегмент із акцентом на доступність і природну привабливість (рис. 2).

Отже, Італія та Греція – преміальні напрямки з високими цінами та люксовим сервісом, а Хорватія залишається більш доступною, але не менш популярною завдяки природі та історії [11].

### Основні виявлені кластери факторів впливу.

#### 1. Економічні фактори:

– Рівень доходів населення та доступність чартерів.

– Вартість утримання та оренди яхт.

– Інвестиції у туристичну інфраструктуру (марины, порти).

– Валютні коливання, що впливають на міжнародний туризм.

#### 2. Технологічні фактори:

– Розвиток екологічних технологій (електродвигуни, сонячні панелі).

– Автоматизація та «смарт-яхти».

– Онлайн-платформи для бронювання чартерів.

– Інновації у матеріалах (легкі композити, стійкі корпуси).

#### 3. Екологічні та регуляторні фактори:

– Вимоги до зниження викидів та охорони морських екосистем.

– Міжнародні стандарти безпеки.

– Обмеження на стоянку в природоохоронних зонах.

– Попит на «зелений туризм».

#### 4. Соціальні та культурні фактори:

– Популярність яхтингу як статусного відпочинку.

– Зростання інтересу до активного туризму серед молоді.

– Культурна спадщина регіонів (Греція, Італія, Хорватія).

– Після пандемічний тренд на приватні подорожі.

#### 5. Ринкові та конкурентні фактори:

– Кількість чартерних компаній і їхня конкуренція.

– Доступність маршрутів (Середземне море, Кариби, Азія).

– Розвиток локальних яхтових клубів.

– Маркетинг і брендинг яхтових напрямків.

Кластерний аналіз показує, що економіка, технології та екологічність є ключовими драйверами розвитку яхтингу, тоді як соціальні та культурні фактори формують попит. У Середземномор'ї всі ці кластери взаємодіють особливо активно, роблячи регіон світовим центром яхтового туризму (рис. 3) [3.4]

6. Поточна ситуація у секції « Чорне море » та фактори впливу:

У 2025 р. Одеська обласна військова адміністрація подала пакет документів до СНБО та Офісу Президента України щодо відновлення яхтингу. Питання перебуває на стадії розгляду, ключовим чинником залишається безпека ситуації в регіоні. Паралельно готується дорожня карта розвитку яхтового туризму, яка включає інфраструктуру, маршрути та співпрацю з ВМС України.

#### Економічні фактори:

– Одеса має портову інфраструктуру, що може бути адаптована під яхтові марины.

– Потенційний ринок – внутрішні туристи та іноземні гості з країн Чорноморського басейну.



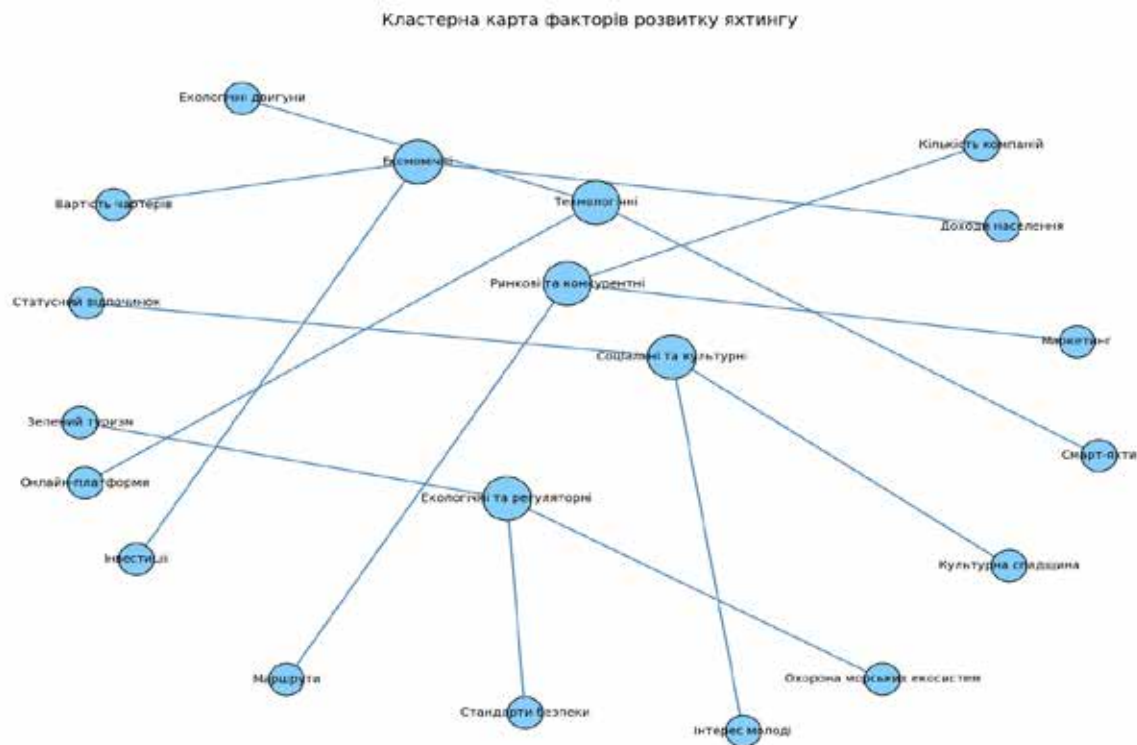


Рис. 3. Фактори впливу на розвиток світового яхтингу

– Відновлення яхтингу створить робочі місця та залучить інвестиції у сферу сервісу, ремонту, чартерів.

Технологічні та екологічні фактори:

– Впровадження екологічних стандартів (очистка води, електродвигуни, сонячні панелі) може стати конкурентною перевагою.

– Одеса здатна позиціонувати себе як «зелений порт» Чорного моря, що відповідає сучасним трендам сталого туризму.

– Технологічні інновації (смарт-яхти, цифрові платформи бронювання) інтегрують регіон у міжнародні практики.

Соціальні та культурні фактори:

– Одеса має морську ідентичність та культурну спадщину, що підсилює бренд міста як морського центру.

– Яхтинг може стати символом відновлення та свободи, поєднуючи спорт, туризм і культурні події.

– Соціальний попит формується серед молоді та середнього класу, які шукають нові формати відпочинку.

Перспективи розвитку:

– Короткострокова (2025–2027): запуск пілотних яхт-клубів, відновлення інфраструктури, тестові чартери.

– Середньострокова (2028–2032): інтеграція у міжнародні маршрути Чорного моря, розвиток еко туризму.

– Довгостроково: формування Одеси як регіонального центру яхтового туризму, порівнянного з Хорватією чи Туреччиною.

Виходячи з вище сказаного -Одеса має всі передумови стати ядром яхтового туризму на Чорному морі. Ключові умови це– політичне рішення, безпека та інвестиції. Поєднання економічних, технологічних та екологічних факторів може перетворити місто на стратегічний центр міжнародного яхтингу.

**Методологічні підходи використані у дослідженні досліджування**

1. Сценарний аналіз(рис. 4),припущення, що закладені у кожний сценарій:

– Оптимістичний- швидке впровадження інновацій, м'які регуляції, високий попит на чартери, розширення інфраструктури марин.

– Базовий- рівномірний розвиток без значних шоків; поступове зниження викидів і стандарти безпеки без жорстких бар'єрів.

– Песимістичний- економічні переривання, жорсткі екостандарти без компенсуючих технологій, слабша капіталізація чартерного сегмента.

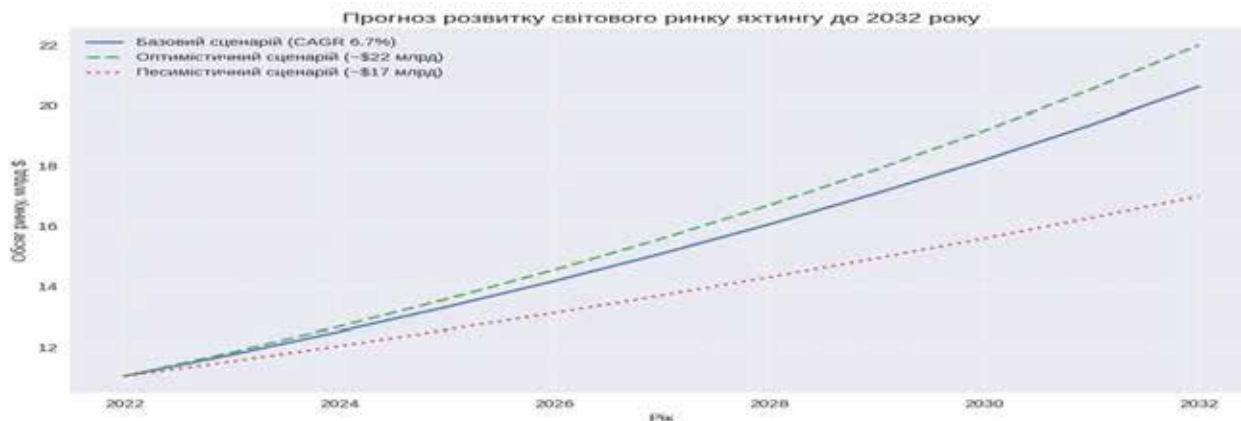


Рис. 4. Прогноз розвитку ринку яхтингу до 2032 р.

Аналіз (рис. 4) для Середземномор'я [10,11,12] дає такі сценарії розвитку:

- Оптимістичний: лідерство регіону посилюється – швидке оновлення флоту, зелена інфраструктура марин, преміальні ціни тримаються.

- Базовий: стабільне домінування за рахунок зрілої пропозиції в Італії, Греції, Хорватії; поступові модернізації.

- Песимістичний: тиск на маржинальність чартерів, довші цикли окупності в маринах, зсув попиту в більш бюджетні формати. культурну та поведінкову основу попиту.

Для проведення статистичного аналізу використовувалася програма SPSS(Statistics Powerful Statistical Software platform), версії 20 [9]. для системи оцінки якісних показників методом ієрархічної агрегації за допомогою програми. Класифікація факторів впливу надано у табл. 1. [11,12]

Методологія використовує поєднання сценарного аналізу, кластерного підходу та екстраполяції трендів (CAGR), фокусується на глобальному ринку яхтингу (2022–2032pp.), із кількісними прогнозами та якісним аналізом факторів. Сценарний та кластерний аналіз дозволяють не лише прогнозувати цифри, а й виявляти ключові драйвери розвитку(рис. 6,7)

Регіональний аспект сфокусовано на особливій увазі до Середземномор'я (Греція, Італія, Хорватія) та потенціалу України[7,8].

На базі даних табл. 1, Надано, представлений нижче, прогноз розвитку яхтингового сегменту за наступними сценаріями:

Оптимістичний сценарій (10% CAGR)(рис. 5):

- 2025: \$14.68 млрд
- 2030: \$23.67 млрд
- 2032: \$28.66 млрд

Базовий сценарій (6.7% CAGR):

- 2025: \$13.41 млрд
- 2030: \$18.38 млрд
- 2032: \$20.62 млрд

Песимістичний сценарій (3% CAGR):

- 2025: \$12.06 млрд
- 2030: \$13.97 млрд
- 2032: \$14.84 млрд

Основні тренди сценаріїв:

- 2022 рік: \$11,04 млрд – відновлення після пандемії, активний розвиток чартерів.

- 2025 рік (прогноз): близько \$13,4 млрд – стабільне зростання завдяки популярності яхтового туризму.

- 2030 рік (прогноз): понад \$18 млрд – ключовий етап, коли екологічні технології та «смарт-яхти» стануть стандартом.

- 2032 рік (прогноз): \$20,62 млрд – майже подвоєння ринку за десятиліття

Результати дослідження корисні для стратегічного планування, інвестиційних рішень та формування політики сталого розвитку. Представлений комплексний аналіз світового ринку яхтингу, поєднуює кількісні та якісні інструменти прогнозування, що дозволяє виявити ключові тенденції та фактори впливу(рис. 7,8).

Наведені методи дослідження:

1.Сценарний аналіз, представлений дозволяє моделювання базової, оптимістичної та песимістичної траєкторій ліній сценарію розвитку ринку із прив'язкою до технологій, регуляцій та макроекономіки.

Статистичні системи на рівні статистики, підкреслюється роль уніфікованих методик і регулярного «барометра» індикаторів для прийняття рішень.

2. Кластерний підхід дає змогу (рис. 5,6,7) кластеризувати фактори: «економіка+ринок»,

## Класифікація факторів впливу

| Категорія                | Показник                  | Значення/Динаміка                        |                                  |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|
| Глобальний ринок яхтингу | 2022                      | \$11.04 млрд                             |                                  |
| Глобальний ринок яхтингу | 2025 (прогноз)            | ~\$13.4 млрд                             |                                  |
| Глобальний ринок яхтингу | 2030 (прогноз)            | ~\$18 млрд                               |                                  |
| Глобальний ринок яхтингу | 2032 (прогноз)            | \$20.62 млрд                             |                                  |
| Глобальний ринок яхтингу | CAGR                      | 6.7%                                     |                                  |
| Середземномор'я          | Греція                    | ~641 яхта у чартері                      |                                  |
| Середземномор'я          | Італія                    | ~337 яхт у чартері                       |                                  |
| Середземномор'я          | Хорватія                  | ~213 яхт у чартері                       |                                  |
| Ціни на чартери          | Греція                    | €2000–10000/тиждень (середні)            | до €200000+ (люкс)               |
| Ціни на чартери          | Італія                    | €80000–300000/тиждень (великі яхти)      |                                  |
| Ціни на чартери          | Хорватія                  | €1200–5000/тиждень (доступніший сегмент) |                                  |
| Кластери факторів        | Економічні та ринкові     | Доходи                                   | інвестиції                       |
| Кластери факторів        | Технологічні              | Електродвигуни                           | смарт-яхти                       |
| Кластери факторів        | Екологічні та регуляторні | Стандарти безпеки                        | охорона екосистем                |
| Кластери факторів        | Соціальні та культурні    | Статусність                              | інтерес молоді                   |
| Кластери факторів        | Конкурентні               | Кількість компаній                       | маршрути                         |
| Динаміка впливу          | Економіка                 | 0.4 → 0.9 (2022–2032)                    |                                  |
| Динаміка впливу          | Технології+Екологія       | 0.2 → 0.6 (2022–2032)                    |                                  |
| Динаміка впливу          | Соціальні                 | 0.4 → 0.4 (стабільно)                    |                                  |
| Сценарії розвитку        | Оптимістичний             | ~\$22 млрд у 2032                        | швидке впровадження інновацій)   |
| Сценарії розвитку        | Базовий                   | \$20.62 млрд у 2032                      | стабільне зростання              |
| Сценарії розвитку        | Песимістичний             | \$16–18 млрд у 2032                      | економічні та регуляторні ризики |



Рис. 5. Сценарії розвитку яхтового ринку

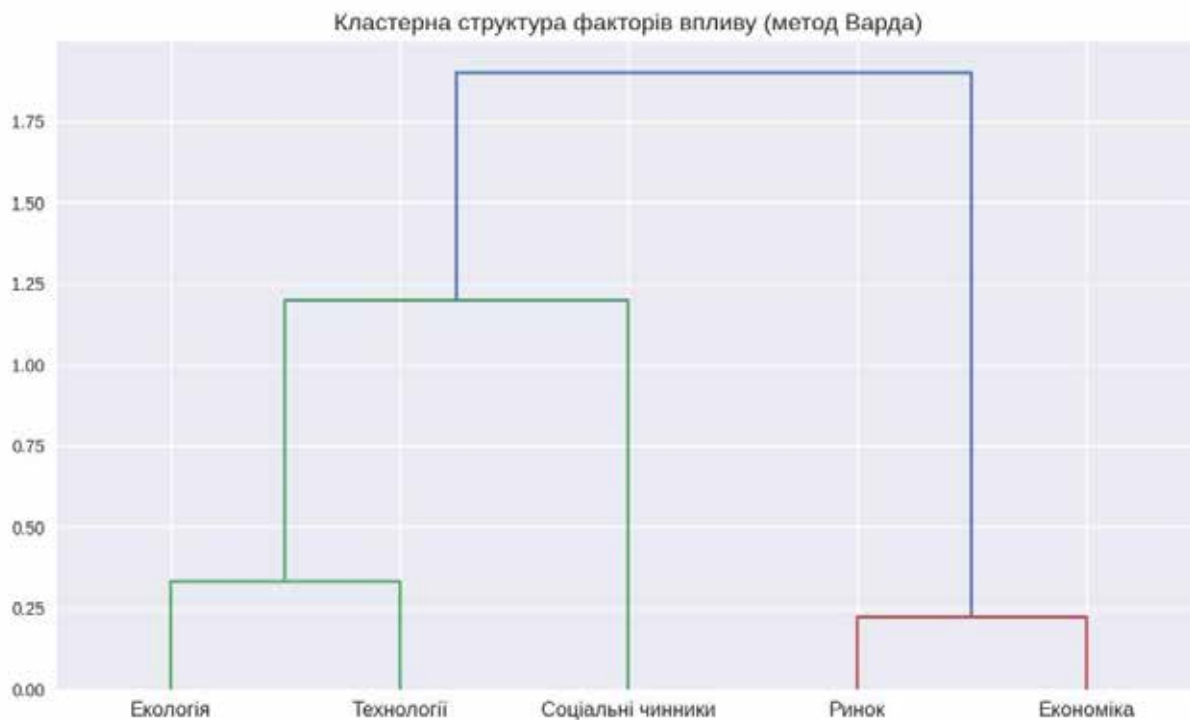


Рис. 6. Кластерна структура факторів впливу

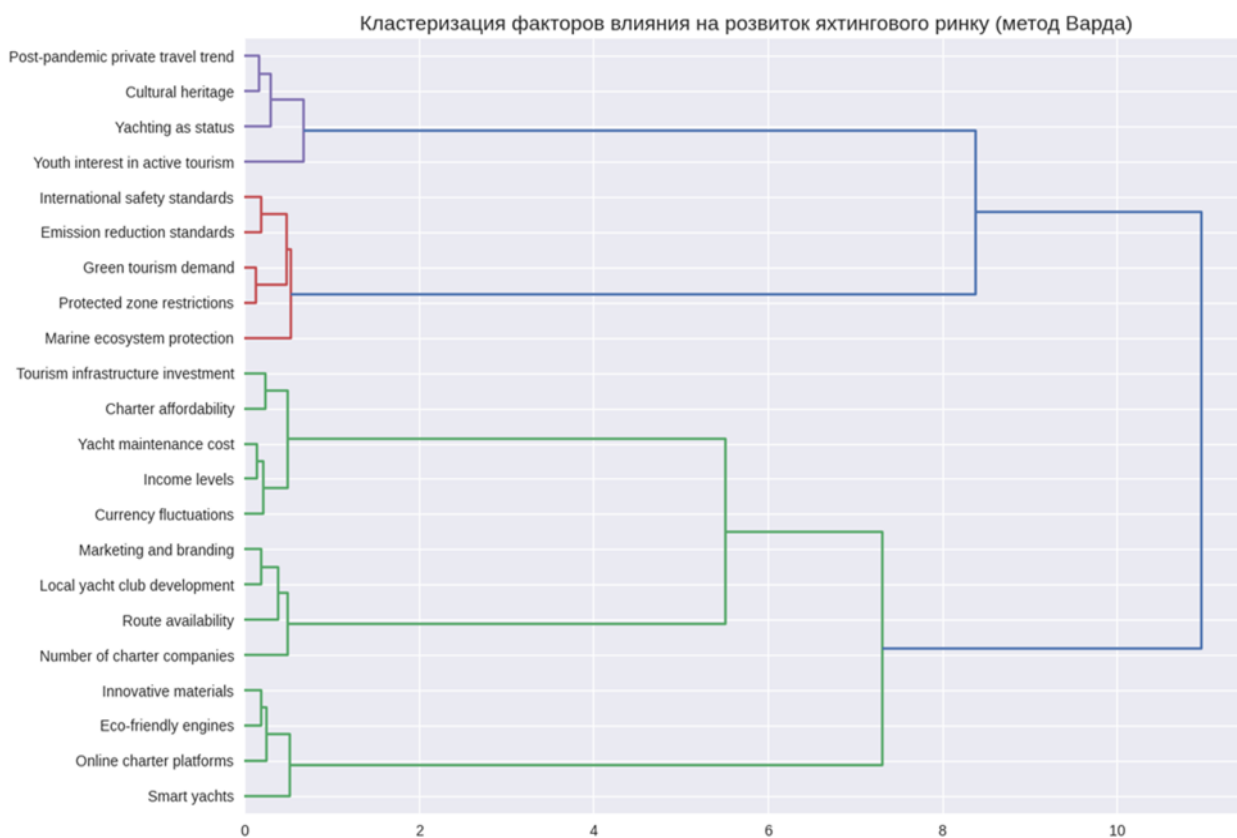


Рис. 7. Кластеризація факторів впливу

«технології+екологія», соціокультура як відносно автономний блок попиту[9,10].

Виділено п'яти груп факторів: економічні, технологічні, екологічні та регуляторні, соціальні й культурні, ринкові та конкурентні.

Застосовано методу Варда для побудови дендрограми, який показує взаємозв'язки між факторами (рис. 5,6,8):

Кластерним аналізом виявлено найближчі групи: «економіка + ринок», « технології + екологія», соціальні чинники як окремий кластер попиту.

Розрахунок інтервалів впливу  $\pm 2$  п.п.

Для кожного кластеру ми моделюємо зміну його впливу на  $\pm 0.02$  (тобто  $\pm 2$  п.п. у межах шкали 0–1), і дивимось, як це вплине на загальний CAGR(рис. 8.).

1. Економічні та ринкові фактори впливу (від 0.5 до 0.9)

Базовий сценарій: CAGR дорівнює 6.4%:

– При +0.02: кінцеве значення = 0.92  $\rightarrow$  CAGR  $\approx 6.7\%$

– При –0.02: кінцеве значення = 0.88  $\rightarrow$  CAGR  $\approx 6.1\%$

– Інтервал впливу: 6.1% – 6.7%

2. Технологічні та екологічні фактори (від 0.3 до 0.7)

– Базовий сценарій, CAGR дорівнює або 8.9%:

– При +0.02: кінцеве значення = 0.72  $\rightarrow$  CAGR  $\approx 9.2\%$

– При –0.02: кінцеве значення = 0.68  $\rightarrow$  CAGR  $\approx 8.6\%$

– Інтервал впливу: 8.6% – 9.2%

3. Соціальні та культурні фактори (стабільні на рівні 0.4):

– CAGR = 0 (немає зростання)

– При +0.02 або –0.02: не змінюється, бо значення постійне

– Інтервал впливу: 0%

Якщо врахувати середнє значення з трьох кластерів, то зміна одного з них на  $\pm 2$  п.п. дає зміну загального CAGR приблизно на  $\pm 0.2$ – $0.3$  п.п., залежно від динаміки.

На графіку(рис. 8) -три стовпчики для кожного кластеру:

Базовий CAGR – розрахований за фактичними даними з графіка (2022–2032р.р.).

– CAGR при +2 п.п. – коли вплив кластеру зростає на 0.02.

– CAGR при –2 п.п. – коли вплив кластеру зменшується на 0.02.

Основні висновки з графіка:

Економічні та ринкові фактори:

Базовий CAGR  $\approx 6.4\%$ , зміна на  $\pm 2$  п.п. дає інтервал 6.1% – 6.7%, це дає найбільший вплив на загальний темп зростання.

Технологічні та екологічні фактори:

Базовий CAGR  $\approx 8.9\%$ , інтервал при варіації: 8.6% – 9.2%.Ці фактори надають високу чутливість до змін, але трохи менший внесок у загальний вплив

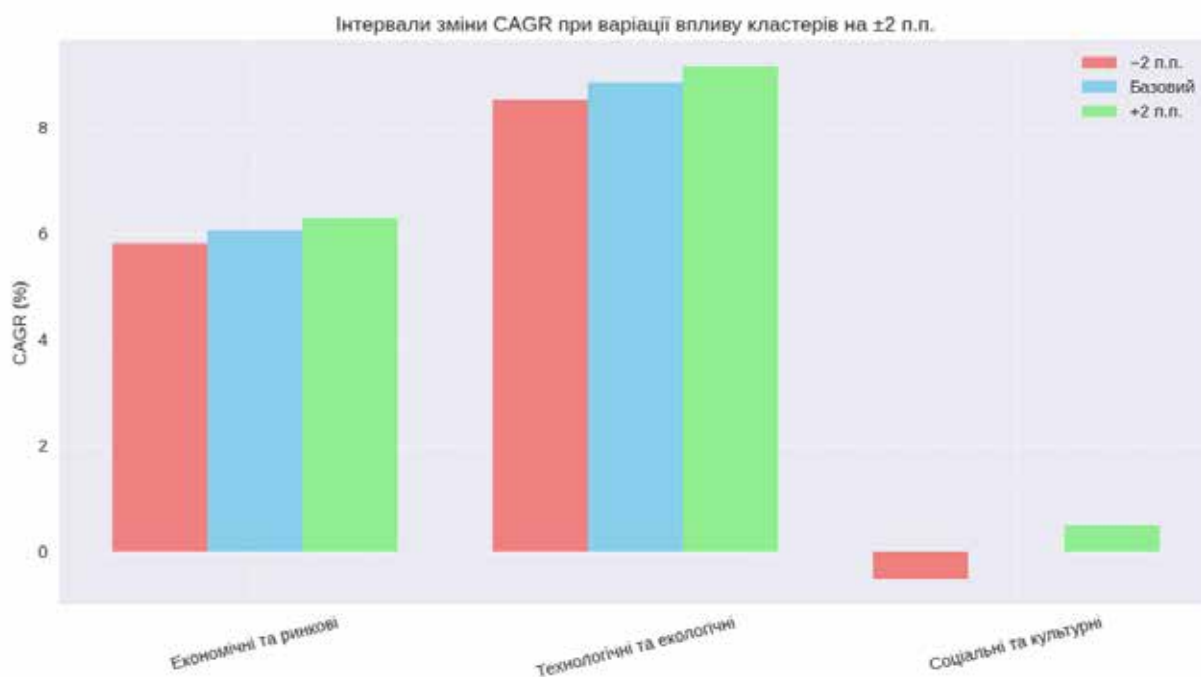


Рис. 8. Інтервали зміни показника Compound Annual Growth Rate (CAGR)

Соціальні та культурні фактори не впливають на темп зростання в моделі,

$CAGR = 0\%$ , оскільки значення не змінюється.

На графіку (рис. 9), наведена динаміка впливу кластерів факторів.

Графік ілюструє зміну рівня впливу трьох кластерів факторів на розвиток яхтингу протягом 2022–2032 років- економічних і ринкових, технологічних і екологічних, соціальних і культурних. Економічні чинники зберігають стабільне домінування, технологічні та екологічні демонструють динамічне зростання, а соціальні залишаються відносно сталими. Це підтверджує зростаючу роль інновацій і сталого розвитку у формуванні майбутніх сценаріїв галузі.

1. Економічні та ринкові фактори (синя лінія):

- Починають з найвищого рівня впливу у 2022 році.
- Протягом десятиліття демонструють стабільне, поступове зростання, що свідчить про збереження їх ролі як фундаменту галузі.

• Це підтверджує, що попит, ціноутворення, інвестиції та ринкова структура залишаються ключовими рушіями розвитку.

2. Технологічні та екологічні фактори (зелена лінія):

- Стартують з нижчого рівня, але демонструють динамічне зростання, особливо після 2025 року.
- До 2032 року, майже наздоганяють економічні фактори, що свідчить про зростаючу роль інновацій, цифровізації, екологічних стандартів та сталого розвитку.

Середньорічний темп зростання (CAGR) становить 6.4%.[11,12]

Найбільш визначальний кластер для розвитку галузі яхтингу це фінансово- економічні та ринкові фактори (табл. 1):

Аналізуючи вище означене робимо висновки, що:

- Фінансово-ринкові фактори залишаються головним рушієм розвитку яхтингу.
- Технології та екологія стають другим за значенням кластером, що визначає інноваційність та стійкість галузі.

– Соціально-культурні фактори мають стабільний, але обмежений вплив.

– Посилення економічних та технологічних кластерів навіть на  $\pm 2$  п.п. суттєво змінює загальний темп розвитку.

Дендрограма кластерного аналізу (рис. 8) демонструє:

– Економічні та ринкові фактори (доходи, інвестиції, конкуренція) формують єдиний кластер, адже вони безпосередньо визначають доступність яхтингу та масштаби ринку.

– Технологічні та екологічні фактори (електродвигуни, смарт-яхти, стандарти безпеки) об'єднуються в кластер інновацій та сталого розвитку.

– Соціальні та культурні фактори (інтерес молоді, статусність, культурна спадщина) залишаються окремим кластером, який формує попит і стиль споживання.

3. Екстраполяція трендів (CAGR)- використаний метод, це кількісна оцінка ринку яхтингу на 10-річному горизонті; поєднується з чутливим аналізом вагомих факторів.

Використано поведінкові методи: конджойнт-аналіз та опитування споживачів, для

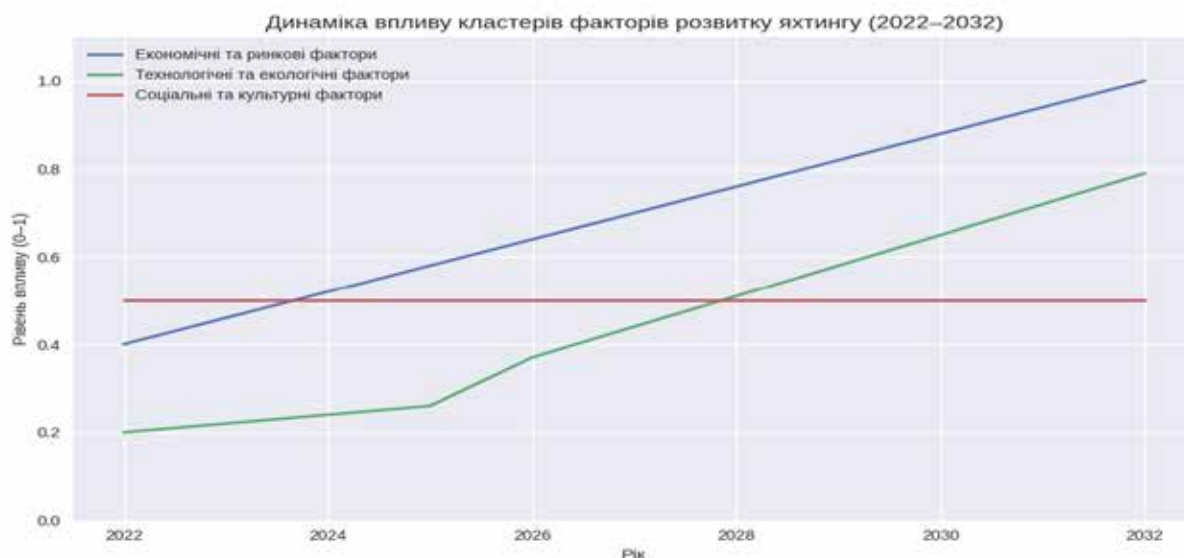


Рис. 9. Динаміка впливу кластерів факторів розвитку яхтингу (2022–2032) [9, 12]



виявлення ключових атрибутів, для визначають вибіру маршруту, класу яхти, рівня сервісу.

Використання показника Compound Annual Growth Rate (6,7%) для базового сценарію.

Формула: показника **Compound Annual Growth Rate (6,7%)** для базового сценарію(рис. 10):

$$CAGR = ((V_i/V_j)^{\frac{1}{n}} - 1) \cdot 100\% \quad (1)$$

Де:

$V_i$  – початкова вартість (Initial Value),

$V_j$  – кінцева вартість (Final Value),

$n$  – кількість років (або періодів).

Показник дає кількісну основу для прогнозування: ринок зростає з \$11,04 млрд у 2022 р. до \$20,62 млрд у 2032 р.

Технологічні та екологічні фактори

– Зростання з 0.3 % до 0.7%

– CAGR: 8.9%

– Висока чутливість до змін, ключовий драйвер інновацій

Соціальні та культурні фактори

– Стабільний рівень впливу (0.4%)

– CAGR: 0%

– Обмежений внесок у загальну динаміку

Інтервали зміни CAGR при варіації  $\pm 2$  п.п.

Економічні: 6.1% – 6.7%

Технологічні: 8.6% – 9.2%

Соціальні: 0%

4. Візуалізація даних (рис. 7,8,9)

• Лінійні графіки для демонстрації прогнозованого зростання світового ринку(1,2,3).

• Столпчикові діаграми для порівняння країн Середземномор'я (Італія, Греція, Хорватія)(7,8,9).

• Кластерні карти та дендрограми для відображення взаємозв'язків між факторами(6,7,8,9).

Одеса як потенційний центр яхтингу[11,12].

Поточна ситуація

– У 2025 році Одеська обласна військова адміністрація подала пакет документів до СНБО та Офісу Президента України щодо відновлення яхтингу.

– Питання перебуває на стадії розгляду, ключовим чинником залишається безпекова ситуація в регіоні.

– Паралельно готується дорожня карта розвитку яхтового туризму, яка включає інфраструктуру, маршрути та співпрацю з ВМС України.

Економічні фактори:

– Одеса має портову інфраструктуру, що може бути адаптована під яхтові марини.

– Потенційний ринок – внутрішні туристи та іноземні гості з країн Чорноморського басейну.

– Відновлення яхтингу створить робочі місця та залучить інвестиції у сферу сервісу, ремонту, чартерів.

Технологічні та екологічні фактори:

– Впровадження екологічних стандартів (очистка води, електродвигуни, сонячні панелі) може стати конкурентною перевагою.

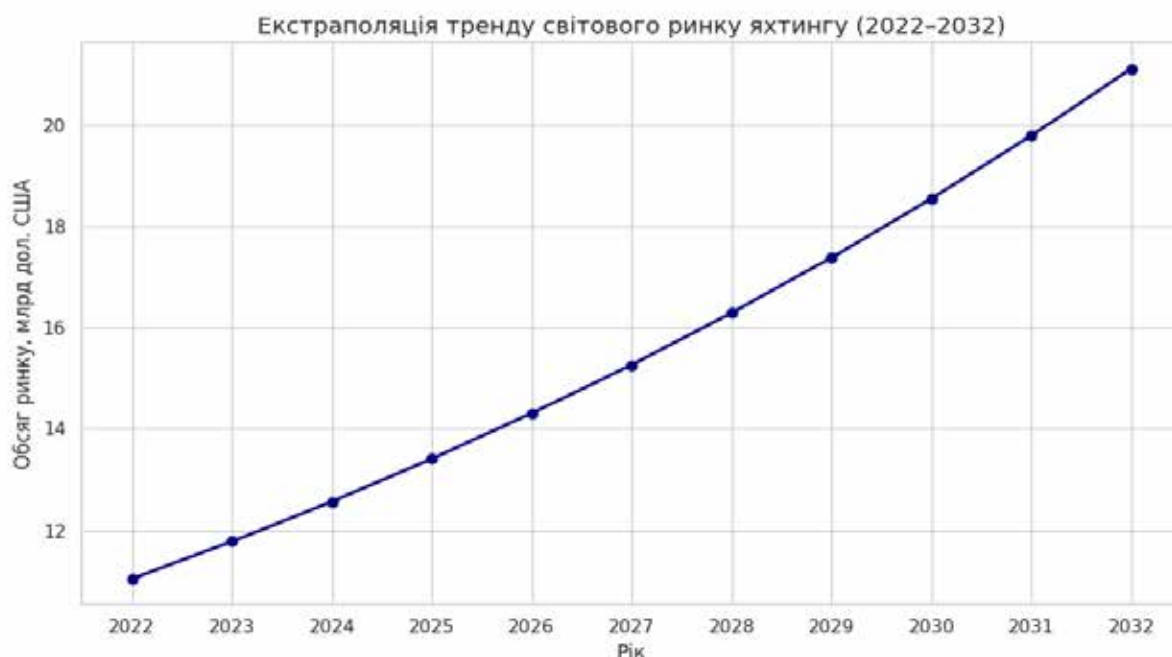


Рис. 10. Графік екстраполяції тренду світового ринку яхтингу на основі методу CAGR (6,7%) [10, 11]



– Одеса здатна позиціонувати себе як «зелений порт» Чорного моря, що відповідає сучасним трендам сталого туризму.

– Технологічні інновації (смарт-яхти, цифрові платформи бронювання) інтегрують регіон у міжнародні практики.

Соціальні та культурні фактори

– Одеса має морську ідентичність та культурну спадщину, що підсилює бренд міста як морського центру.

– Яхтинг може стати символом відновлення та свободи, поєднуючи спорт, туризм і культурні події.

– Соціальний попит формується серед молоді та середнього класу, які шукають нові формати відпочинку.

Перспективи розвитку:

– Короткостроково (2025–2027): запуск пілотних яхт-клубів, відновлення інфраструктури, тестові чартери.

– Середньостроково (2028–2032): інтеграція у міжнародні маршрути Чорного моря, розвиток екотуризму.

– Довгостроково: формування Одеси як регіонального центру яхтового туризму, порівнянного з Хорватією чи Туреччиною.

## Висновки

1. Аналіз світовий ринку яхтингу показав, що він перебуває у фазі стійкого зростання. За прогнозами, його обсяг зросте з \$11,04 млрд у 2022 році до \$20,62 млрд у 2032 році, що означає майже подвоєння за десятиліття. Середній річний темп зростання (CAGR) становить 6,7%, що підтверджує стабільність галузі та її інвестиційну привабливість.

Основними чинниками цього зростання є:

– збільшення попиту на чартерні яхти як доступну альтернативу володінню;

– інтеграція яхтингу у сферу туризму, спорту та оздоровлення;

– поширення екологічних технологій та цифрових сервісів.

2. Сценарний аналіз траєкторій розвитку ринку яхтингу, застосовано:

– Базовий сценарій передбачає стабільне зростання з темпом CAGR 6,7% та поступове розширення географії ринку.

– Оптимістичний сценарій прогнозує прискорене зростання (до 7,5–8% CAGR) за умови активного впровадження екологічних технологій, цифровізації та державної підтримки.

– Песимістичний сценарій передбачає уповільнення (до 4–5% CAGR) через геополітичні ризики, економічні кризи та регуляторні бар'єри.

Сценарний аналіз показує, що технологічні та екологічні фактори є ключовими драйверами, які визначають відхилення від базової траєкторії.

## 3. Кластерна структура факторів впливу.

Методом кластерного аналізу виділено три основні групи факторів:

– «Економіка + ринок» – формують основу динаміки попиту та пропозиції.

– «Технології + екологія» – взаємопов'язані фактори, що визначають конкурентоспроможність та відповідність регуляції.

– Соціальні чинники – окремий кластер, який формує структуру попиту (сімейний відпочинок, спортивні та оздоровчі практики).

Дендрограми показують (рис. 7,8) що найближчий зв'язок існує між економічними та ринковими факторами, тоді як соціальні чинники залишаються відносно автономними.

## 4. Регіональний аспект: Середземномор'я (Греція, Італія, Хорватія), Чорне море.

Середземномор'я залишається ключовим центром яхтового туризму, проте країни демонструють різні моделі розвитку:

– Греція – абсолютний лідер за кількістю яхт у чартері (641), що пояснюється великою кількістю островів та розвинутою інфраструктурою.

– Італія – близько 337 яхт, сильна позиція у преміальному сегменті (Сардинія, Сицилія, Амальфі).

– Хорватія – 213 яхт, менший флот, але високий попит завдяки доступним цінам і чистому Адриатичному морю.

Конкуренція між країнами формує різні моделі розвитку:

– Греція – масовий сегмент із широкою доступністю;

– Італія – преміальний сегмент із високою доданою вартістю;

– Хорватія – демократичний сегмент із акцентом на доступність і природну привабливість.

## Наукова новизна дослідження

1. Розроблено методологію сценарного аналізу для прогнозування розвитку яхтового ринку, що дозволяє моделювати базові, оптимістичні та песимістичні траєкторії. Впроваджено Інтеграцію методів яка уперше поєднала сценарний аналіз, кластерний підхід та екстраполяцію трендів (CAGR) для комплексного прогнозування розвитку світового ринку яхтингу.

2. Запропонована Кластеризація факторів впливу: розроблено модель систематизації економічних, технологічних, екологічних, соціальних та ринкових чинників із використанням методу

Варда, що дозволяє виявити їх взаємозв'язки та силу впливу.

3. Використання показника CAGR, забезпечує кількісну основу для прогнозування, яка може бути застосована у подальших академічних дослідженнях транспортної та туристичної економіки. За допомогою сценарного моделювання: побудовано три сценарії розвитку (базовий, оптимістичний, песимістичний), які враховують технологічні інновації, екологічні регуляції та макроекономічні умови як ключові драйвери відхилення від базової траєкторії.

4. Регіональний аспект: здійснено порівняльний аналіз моделей розвитку яхтового туризму у Греції, Італії та Хорватії, що дозволяє визначити конкурентні переваги та перспективи інтеграції України у світові тенденції.

5. Практична спрямованість: результати дослідження формують методологічну основу для стратегічного планування, інвестиційних рішень

та державної політики сталого розвитку у сфері морських перевезень і туризму.

**Практичне значення.** Результати можуть бути використані інвесторами та компаніями для оцінки перспектив ринку і прийняття рішень щодо розвитку чартерного бізнесу, верфей та інфраструктури.

Державні та регіональні органи влади отримують інструмент для формування політики сталого розвитку, враховуючи екологічні та соціальні фактори.

Освітні та наукові установи можуть застосовувати розроблену методику для навчання студентів економічних і транспортних спеціальностей, а також для подальших досліджень у сфері морського туризму. Практики яхтової індустрії (марини, чартерні компанії, клуби) отримують аналітичну основу для оптимізації бізнес-моделей та адаптації до глобальних викликів

#### Список літератури:

1. Савельєва І. В., Наврозова Ю. О. Вплив яхтового туризму на сталий розвиток економіки. *Управління та господарювання на транспорті*. Одеса, 2023. № 3(84). С. 117–133.
2. Іванов А. М., Мамашева О. В. Особливості функціонування яхтового туризму. Економічний розвиток держави, регіонів і підприємств: проблеми та перспективи: *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2021. С. 203–204.
3. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. Київ : НУБіП України, 2024.
4. Choi E.-Y., Jang W.-Y., Park T.-H. Key Attributes Driving Yacht Tourism: Exploring Tourist Preferences Through Conjoint Analysis. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Iss. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083336>.
5. Yao Y., Li Z., Zhou X., Parmak M. Yachting Tourism Consumption Potential and Its Influencing Factors: Considering 12 Coastal Cities in China as Examples. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151612490>.
6. *Luxury Yachting: Perspectives on Tourism, Practice and Context* / T. Gladkikh T., Séraphin H., Gladkikh V. (ред.). Cham: Springer, 2022. 256 p.
7. *Global Yachting Market Report 2023–2032*. Pune: MMR, 2023. (Maximize Market Research).
8. *Technological Trends in the Yachting Industry*. London: Onboard Online, 2024.
9. Farakhutdinov Sh. F., Bushuyev A. S. Processing and Analysis of Sociological Research Data in the SPSS 17.0 Package. Course of lectures: tutorial. Tyumen: TyumSOGU, 2011. 220 p. ISBN 978-5-9961-0414-7.
10. Шибаєв О. Г., Сільванська Г. М., Кручек С. В. Методика виявлення факторів впливу на пасажирообіг при проектуванні круїзних ліній. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Серія «Транспортні системи та технології». Херсон: ХНТУ, 2024. Т. (1) 88.
11. *Tourism Market Trends 2024: Marine and Coastal Tourism*. Madrid: World Tourism Organization (UNWTO), 2024.
12. *Annual Report on Recreational Boating and Yachting in Europe*. Brussels: EBI, 2023.
13. *Mediterranean Yacht Charter*. CharterWorld. URL: <https://www.charterworld.com/index.html?sub=mediterranean-yacht-charter>

#### Silvanskaya G.N. GLOBAL TRENDS IN YACHTING MARKET DEVELOPMENT SCENARIO AND CLUSTER approach

*The study investigates global trends in the development of the yachting market during 2022–2032, applying scenario modeling and cluster analysis. Using the CAGR method, the research identifies a steady growth trajectory from USD 11.04 billion in 2022 to USD 20.62 billion in 2032, with an average annual growth rate of 6.7%. Scenario analysis highlights three possible pathways—baseline, optimistic, and pessimistic—driven by technological innovation, ecological regulation, and macroeconomic conditions. Cluster analysis reveals the structural interdependence of economic and market factors, technological and ecological drivers, and*

*social-cultural determinants. Comparative evaluation of Mediterranean countries (Greece, Italy, Croatia) demonstrates differentiated models of charter yacht development. The findings provide methodological and practical contributions for strategic planning, investment decisions, and sustainable policy in maritime transport and tourism.*

*The relevance of the problem lies in the fact that yachting as a form of passenger transportation is turning into a mass format of transportation, ceasing to be only an elite segment and where environmental friendliness, innovation and accessibility are becoming determining factors of future development.*

*The practical significance lies in the fact that the results can be used by investors and companies to assess market prospects and make decisions on the development of charter business, shipyards and infrastructure. Yacht industry practitioners (marinas, charter companies, clubs) receive an analytical basis for optimizing business models and adapting to global challenges. State and regional authorities receive a tool for shaping sustainable development policies, taking into account environmental and social factors.*

**Keywords:** *yachting tourism, global yachting market, scenario analysis, cluster approach, CAGR (Compound Annual Growth Rate), ecological technologie, sustainable development, Mediterranean region, charter business.*

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 004.942:656.2:620.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/49>

**Фомін О.В.**

<https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

Національний транспортний університет

**Хара М.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-6818-7938>

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Маслак Г.В.**

<https://orcid.org/0000-0001-7256-5543>

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Сущенко Р.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-4457-8563>

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Каплуновська А.М.**

<https://orcid.org/0000-0003-3734-1098>

Національний університет «Запорізька політехніка»

## ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ У АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИПРОБУВАНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

*У статті розглянуто науково-прикладні аспекти впровадження технології цифрових двійників у процеси автоматизації випробувань та оцінки технічного стану об'єктів залізничної інфраструктури. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до безпеки та надійності функціонування залізничного транспорту на тлі інтенсивного фізичного зносу інфраструктурних об'єктів і обмежених можливостей традиційних методів діагностики. Показано, що регламентні та періодичні випробування не забезпечують своєчасного виявлення дефектів, не враховують динаміку деградаційних процесів і значною мірою залежать від людського фактора, що знижує достовірність результатів оцінювання.*

*Метою дослідження є підвищення точності, оперативності та об'єктивності оцінки технічного стану залізничної інфраструктури шляхом розроблення та обґрунтування методології використання цифрових двійників у системах автоматизованих випробувань. Для досягнення поставленої мети застосовано системний підхід, методи аналізу та синтезу, математичне та комп'ютерне моделювання, а також узагальнення результатів сучасних вітчизняних і зарубіжних досліджень у сфері цифровізації транспортних систем.*

*У роботі обґрунтовано концепцію цифрового двійника як динамічної віртуальної моделі, що перебуває у двосторонньому інформаційному зв'язку з фізичним об'єктом на основі даних автоматизованих вимірювальних систем. Запропоновано узагальнену архітектуру інтеграції сенсорних мереж, систем збору даних, аналітичних модулів та віртуального моделювання, яка забезпечує автоматизацію випробувань і прогнозування залишкового ресурсу конструкцій. Показано можливості перенесення частини випробувальних процедур у віртуальне середовище, що дозволяє зменшити вартість і тривалість експериментів, а також усунути ризики, пов'язані з відтворенням граничних навантажень у натурних умовах.*

*Наукова новизна роботи полягає у формуванні комплексного підходу до використання цифрових двійників саме як інструменту автоматизації випробувань об'єктів залізничної інфраструктури з урахуванням реальних експлуатаційних впливів та деградаційних процесів. Практична значимість*



*отриманих результатів полягає у можливості переходу від планово-регламентного обслуговування до предиктивної стратегії утримання інфраструктури за фактичним технічним станом, що сприяє зниженню аварійності, оптимізації ремонтних робіт і підвищенню ефективності функціонування залізничного транспорту в умовах цифрової трансформації.*

**Ключові слова:** транспорт, транспорту технології, залізнична інфраструктура, автоматизація, випробування, цифрові двійники, технічний стан.

**Постановка проблеми.** Сучасний світ переживає етап стрімкої цифровізації, що докорінно змінює підходи до управління промисловими об'єктами. Залізничний транспорт, як критично важлива артерія економіки будь-якої держави, не може залишатися осторонь цих процесів. Зростання обсягів перевезень вимагає підвищення надійності та безпеки інфраструктури. Традиційні методи діагностики та випробувань часто базуються на регламентних оглядах, які не завжди враховують реальний стан об'єкта. Це призводить до ризику пропуску дефектів, що розвиваються раптово. Крім того, фізичний знос залізничної інфраструктури у багатьох країнах досягає критичних позначок. Необхідність подовження життєвого циклу об'єктів вимагає точних інструментів моніторингу. Людський фактор при проведенні випробувань залишається однією з головних причин помилок в оцінці стану. Автоматизація процесів дозволяє мінімізувати суб'єктивні похибки. Впровадження концепції Індустрії 4.0 відкриває нові можливості для інтелектуального аналізу даних. Однією з ключових технологій цієї епохи є створення цифрових двійників. Цифровий двійник – це не просто 3D-модель, а динамічна система, що живе життям реального об'єкта. Вона отримує дані в реальному часі від сенсорів та датчиків. Використання таких моделей дозволяє перенести частину випробувань у віртуальне середовище. Це значно знижує вартість проведення експериментів. Віртуальні випробування дозволяють моделювати критичні навантаження, які небезпечно відтворювати на реальній колії.

Основна проблема полягає у протиріччі між зростаючими вимогами до безпеки та інтенсивності залізничних перевезень і застарілими методами оцінки технічного стану інфраструктури. Традиційні методи випробувань є дискретними, трудомісткими та часто залежать від суб'єктивної кваліфікації персоналу, що знижує достовірність отриманих результатів. Водночас існуючі системи автоматизованого моніторингу генерують величезні масиви даних, які не використовуються ефективно для прогнозування ресурсу через відсутність адекватних математичних моделей. Складність полягає у необхідності об'єднання фізичних параметрів реального об'єкта з його

віртуальним аналогом для забезпечення двостороннього зв'язку в режимі реального часу. Наразі відсутній єдиний науково-методичний підхід до створення цифрових двійників, здатних автоматично адаптуватися до змін фізичних характеристик об'єкта в процесі експлуатації. Проблемаю є також висока вартість натурних випробувань на граничні стани, що унеможливорює часту перевірку запасу міцності конструкцій. Крім того, різномірність вимірювального обладнання ускладнює створення уніфікованої цифрової екосистеми для залізниці. Невирішеним залишається питання достовірної кореляції між результатами віртуального моделювання та даними автоматизованих натурних вимірювань. Це призводить до низької точності прогнозів залишкового ресурсу та неефективного планування ремонтних робіт. Відтак, виникає необхідність розробки науково обґрунтованих засад використання цифрових двійників як інструменту автоматизації випробувань. Вирішення цієї проблеми дозволить перейти до предиктивного обслуговування, знизити аварійність та оптимізувати експлуатаційні витрати.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Публікація [1] досліджує принципи створення цифрового двійника стрілочного перевезу з урахуванням впливу погодних умов. Автори пропонують інноваційну систему моніторингу, що поєднує датчики вологості, температури та атмосферного тиску. Модель дозволяє підвищити точність прогнозування відмов, пов'язаних із обмерзанням чи деформацією вузлів. Значну увагу приділено інтеграції даних у цифровий двійник для оперативного керування станом об'єкта. Результати демонструють потенціал скорочення витрат на обслуговування та підвищення надійності стрілок.

Стаття [2] розглядає гібридні моделі та цифрові двійники для моніторингу стану HVAC-систем у залізничному транспорті. Автори комбінують фізичні та дані-орієнтовані моделі для підвищення точності оцінювання стану устаткування. Отриманий цифровий двійник дозволяє прогнозувати відмови та оптимізувати енергоспоживання.

Автори [3] аналізують можливості цифрових двійників для підвищення ефективності технічного обслуговування та стійкості залізничної

інфраструктури. Запропоновано концептуальну систему управління об'єктами інфраструктури на основі даних реального часу. Дослідження акцентує увагу на адаптивності моделей до різних сценаріїв експлуатації.

У статті [4] запропоновано метод автоматичної глобальної реєстрації 3D-облачних точок для тунелів. Підхід забезпечує високу точність визначення просторового положення та деформацій об'єкта. Автори використовують багатостанційну систему збору даних, що підвищує точність геометричної реконструкції. Метод показує стійкість до шумів та обмеженого огляду.

Публікація [5] присвячена розробленню високонадійної гібридної системи передачі даних для безпілотних надводних апаратів в умовах перешкод. Запропоновано схему, що комбінує кілька технологій зв'язку для зниження ризику втрати інформації. Автори оцінюють завадостійкість системи та її продуктивність у реальних експериментальних умовах. Отримані результати підтверджують ефективність гібридного підходу. Висновки демонструють потенціал масштабування рішення на інші транспортні системи.

Стаття [6] аналізує можливості сталого впровадження відновлюваної енергетики у морському транспорті. Автори розглядають технологічні, екологічні та економічні аспекти переходу на чисті джерела енергії. Значну увагу приділено оцінці ефективності гібридних силових установок. Наведено приклади перспективних інженерних рішень і сценаріїв розвитку галузі.

Робота [7] присвячена визначенню параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Автори поєднують теоретичні моделі та експериментальні дані для оцінки ефективності системи. Запропоновано підхід до вибору оптимальної ємності накопичувача залежно від режимів роботи. Дослідження демонструє підвищення енергоефективності та зниження навантаження на мережу живлення.

У статті [8] досліджено динамічне навантаження на піввагон при його фіксації віскозним зчепленням на палубі порому. Автори побудували математичну модель взаємодії вагона з платформою судна при хвилюванні. Розрахунки показують вплив режимів руху порому на навантаження у вузлах конструкції. Встановлено особливості передавання навантаження через віскозне зчеплення.

Публікація [9] присвячена оцінці міцності рами відкритого піввагона, виготовленої з круглих труб, при перевезенні поромом. Автори виконали

моделювання напружено-деформованого стану конструкції в умовах дії хвильових навантажень. Дослідження показує потенційні зони концентрації напружень.

Стаття [10] розглядає застосування цифрових двійників у технічному обслуговуванні та управлінні залізничними мостами. Автори аналізують вплив кліматичних змін на експлуатацію мостових конструкцій. Запропонована модель дозволяє прогнозувати критичні стани та оптимізувати ремонтні роботи. Інтеграція сенсорних систем із цифровим двійником забезпечує отримання даних у реальному часі.

У публікації [11] наведено кейс інтеграції системи моніторингу залізничного мосту в IoT-середовище за допомогою цифрового двійника. Автори розробили архітектуру, що забезпечує передачу даних у реальному часі та аналітику. Система дозволяє виявляти аномалії та оцінювати залишковий ресурс конструкції.

Аналіз вітчизняних та закордонних джерел засвідчив значний інтерес наукової спільноти до технології цифрових двійників у промисловості загалом. Проте більшість існуючих досліджень фокусуються на окремих аспектах моделювання або на моніторингу рухомого складу, залишаючи інфраструктурні об'єкти на другому плані. З'ясовано, що питанню створення цілісної методології використання цифрових двійників саме для автоматизації випробувань та оцінки стану інфраструктури не приділено достатньої уваги.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є підвищення достовірності та оперативності оцінки технічного стану об'єктів залізничної інфраструктури шляхом розробки методології створення та використання цифрових двійників у системах автоматизованих випробувань. Це передбачає формування інтегрованого середовища, де дані натурних вимірювань у реальному часі корегують параметри віртуальної моделі для точного прогнозування ресурсу конструкцій. Досягнення мети дозволить забезпечити перехід від регламентного обслуговування до стратегії утримання інфраструктури за фактичним станом з використанням предикативної аналітики.

**Виклад основного матеріалу.** Використання цифрових двійників для автоматизації випробувань та оцінки стану залізничної інфраструктури – це один з ключових трендів у концепції "Залізниць 4.0". Це підвищує безпеку, знижує витрати та переводить технічне обслуговування на проактивну модель.

Цифровий двійник (Digital Twin) – це не про-

сто 3D-модель або креслення. Це динамічна, віртуальна копія фізичного об'єкта або системи, яка обмінюється з ним даними в реальному часі за допомогою датчиків (IoT), телеметрії та історичних даних.

Стосовно залізничної інфраструктури, цифровий двійник може охоплювати: колію (рейки, шпали, баласт), мости, тунелі, контактну мережу, системи сигналізації та централізації; рухомий склад: локомотиви, вагони; цілі системи: залізничний вузол, сортувальна станція, ділянка колії.

Далі наведено, як саме цифрові двійники використовуються в автоматизації випробувань та оцінці стану. Процес можна розділити на кілька ключових етапів:

1. Збір даних у реальному часі (Фізичний об'єкт → Цифрова копія).

Фізичні об'єкти обладнуються мережею датчиків: акселерометри та датчики вібрації на рухомому складі та інфраструктурі для оцінки динамічних навантажень та стану колії; тензометри на мостах і рейках для вимірювання деформацій та напружень; датчики температури для моніторингу стану рейок (боротьба з солеутвореннями); візуальні системи: камери високої роздільної здатності та дрони для автоматичного візуального огляду; датчики зносу для вимірювання ступеня зносу рейок та гальмівних колодок. Дані з цих датчиків у реальному часі надходять у цифрового двійника.

2. Автоматизоване тестування та моделювання в цифровому двійнику (Віртуальні випробування). Замість того, щоб проводити фізичні випробування, які часто вимагають зупинки руху, інженери можуть: моделювати екстремальні навантаження – симуляції через двійника віртуальні потяги з різною вагою, швидкістю, в різних погодних умовах, щоб оцінити вплив на інфраструктуру без ризику пошкодження; прогнозувати знос: алгоритми штучного інтелекту (ШІ) аналізують дані про навантаження та матеріали, щоб передбачити, коли ділянка колії або елемент моста потребуватимуть заміни; діагностувати несправності: двійник порівнює реальні показники датчиків із ідеальною моделлю. відхилення (наприклад, аномальна вібрація) автоматично ідентифікуються як потенційний дефект; ієстувати нове обладнання: Перед впровадженням нового рухомого складу або системи безпеки їх можна спочатку "випробувати" у віртуальному середовищі цифрового двійника.

3. Аналіз, візуалізація та прийняття рішень. Отримані результати візуалізуються для людини:

інтерактивні карти: стан колії відображається кольорами (зелений = добрий, жовтий = задовільний, червоний = критичний); панелі управління: показують ключові показники ефективності (KPI) у реальному часі; сигнали тривоги: Система автоматично генерує попередження про необхідність обслуговування або навіть сама формує заявку на ремонт.

Конкретні приклади застосування. 1. Моніторинг стану колії: потяг-лабораторія з датчиками проходить ділянку. Дані передаються двійнику, який будує карту зносу рейок і визначає ділянки, де необхідне шліфування або заміна. Це автоматизує та прискорює процес, який раніше вимагав ручного огляду. 2. Оцінка міцності моста: двійник моста отримує дані про навантаження від кожного потяга, що проїжджає. Він моделює, як ці навантаження впливають на "втому" металу, і точно прогнозує залишковий ресурс конструкції. 3. Оптимізація обслуговування контактної мережі: дрони сканують контактну мережу, а ШІ аналізує знімки, виявляючи дефекти (наприклад, зношені контактні дроти). Ця інформація інтегрується в двійника, який формує оптимальний графік обслуговування для ремонтних бригад.

В якості переваг використання цифрових двійників можна виділити наступні. Підвищення безпеки: раннє виявлення дефектів запобігає аварійним ситуаціям. Зниження витрат: перехід від планово-запобіжного ремонту до ремонту за фактичним станом. Це дозволяє використовувати ресурси ефективніше і уникнути зайвих замін. Збільшення пропускної спроможності: менше "вікон" для оглядів, більше часу для руху поїздів. Проактивне обслуговування: ремонтуємо не тоді, коли щось зламалося, а тоді, коли дані показують, що це скоро станеться. Прискорення випробувань: віртуальні тести проводяться набагато швидше за фізичні та не мають обмежень за масштабом.

Цифрові двійники перетворюють підхід до управління залізничною інфраструктурою. Вони роблять процес випробувань та оцінки технічного стану автоматизованим, даними-орієнтованим і прогностичним. Це не просто інновація, а фундаментальний крок до створення безпечних, ефективних та "розумних" залізниць майбутнього.

**Висновки.** У роботі вирішено важливе науково-прикладне завдання підвищення ефективності оцінки технічного стану залізничної інфраструктури шляхом впровадження цифрових двійників у процеси автоматизації випробувань. Аналіз показав, що традиційні методи діагностики вичерпали свій потенціал щодо оператив-



ності та точності, що вимагає переходу до цифрових технологій.

Розроблено та обґрунтовано методологію створення цифрового двійника, який динамічно змінюється відповідно до фізичного стану реального об'єкта. Створено алгоритми автоматизованої обробки діагностичної інформації, які дозволяють нівелювати вплив людського фактора на результати оцінки. Доведено, що використання запропонованого підходу дозволяє підвищити достовірність прогнозування залишкового ресурсу конструкцій. Запропонована архітектура системи забезпечує інтеграцію різнорідних потоків даних у єдине інформаційне середовище. Практична реалізація результатів дослідження дозволяє перейти до стратегії предиктивного обслуговування

інфраструктури. Це забезпечує значну економію коштів за рахунок запобігання раптовим відмовам та оптимізації ремонтних робіт. Розроблені моделі та алгоритми успішно пройшли первинну верифікацію на тестових ділянках залізниці.

Визначено технічні вимоги до апаратного забезпечення для розгортання повномасштабних систем цифрових двійників. Встановлено, що ключовим фактором успіху є якість калібрування моделі на етапі ініціалізації системи. Результати роботи створюють підґрунтя для цифрової трансформації служби колії та споруд.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію розроблених моделей із системами керування рухом поїздів для комплексного забезпечення безпеки.

### Список літератури:

1. Kampczyk A., Dybeł K. The fundamental approach of the digital twin application in railway turnouts with innovative monitoring of weather conditions. *Sensors*. 2021. 21(17), 5757. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21175757>
2. Gálvez A., Rubio J., Seneviratne D., González A., Jiménez A., Martínez-de-Estarrona U., Galar D. Hybrid models and digital twins for condition monitoring: HVAC system for railway (SNE Tech. Note). *Simulation Notes Europe*. 2021. 31(3), 121–126. DOI: <https://doi.org/10.11128/sne.31.tn.10572>
3. Kaewunruen S., Sresakoolchai J., Lin Y.-H. Digital twins for managing railway maintenance and resilience. *Open Research Europe*. 2021. 1, 91. DOI: <https://doi.org/10.12688/openreseurope.13806.2>. PubMed
4. Wang J., Wei X., Wang W., Wang J., Peng J., Wang S., Zaheer Q., You J., Xiong J., Qiu S. A multistation 3D point cloud automated global registration and accurate positioning method for railway tunnels. *Structural Control and Health Monitoring*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6705090>
5. Kurdiuk S., Dremliuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 2025. 9(3), 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
6. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. P. 165–188. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
7. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
8. Fomin O., Lovska A., Kulbovskyi I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2(7). С. 6–12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2019\\_2\(7\)\\_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
9. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21, № 1. 28–34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
10. Kaewunruen S., AbdelHadi M., Kongpuang M., Pansuk W., Remennikov A. M. Digital twins for managing railway bridge maintenance, resilience, and climate change adaptation. *Sensors*. 2023. 23(1), 252. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23010252>
11. Armijo A., Zamora-Sánchez D. Integration of railway bridge structural health monitoring into the Internet of Things with a digital twin: A case study. *Sensors*. 2024. 24(7), Article 2115. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24072115>

**Fomin O.V., Khara M.V., Maslak H.V., Sushchenko R.V., Kaplunovska A.M. DIGITAL TWINS IN TEST AUTOMATION FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF RAILWAY INFRASTRUCTURE FACILITIES**

*The article addresses the scientific and applied aspects of implementing digital twin technology in the automation of testing processes for assessing the technical condition of railway infrastructure facilities. The relevance of the study is driven by the increasing requirements for safety, reliability, and uninterrupted operation of railway transport, alongside the significant physical deterioration of infrastructure assets and the limited effectiveness of traditional diagnostic methods. Conventional scheduled inspections and testing procedures are often discrete in nature, highly labor-intensive, and strongly dependent on the human factor, which reduces the accuracy and objectivity of the obtained results. In addition, such approaches do not adequately account for the dynamic evolution of degradation processes under real operational loads.*

*The purpose of the research is to improve the accuracy, efficiency, and reliability of technical condition assessment of railway infrastructure by developing a methodological framework for the use of digital twins within automated testing systems. To achieve this goal, a systematic approach was employed, combining methods of analysis and synthesis, mathematical and computer modeling, and a comprehensive review of recent domestic and international research in the field of transport digitalization.*

*The study substantiates the concept of a digital twin as a dynamic virtual representation of a physical infrastructure object that maintains a bidirectional data exchange with its real counterpart through sensor networks, automated measurement systems, and telemetry data. A generalized architecture for integrating heterogeneous data sources, analytical modules, and virtual simulation environments is proposed, enabling the automation of testing procedures and real-time updating of model parameters. This approach allows a significant portion of experimental testing to be transferred to a virtual environment, where extreme and critical loading scenarios can be safely simulated without disrupting railway operations or risking damage to physical assets.*

*It is demonstrated that the use of digital twins enables continuous monitoring of stress-strain states, deformation development, and fatigue damage accumulation in infrastructure elements such as tracks, bridges, tunnels, and contact networks. The integration of digital twins with intelligent data analysis and predictive algorithms provides the basis for forecasting residual service life and identifying potentially hazardous conditions at early stages. As a result, decision-making processes related to maintenance and repair planning become more objective, timely, and data-driven.*

*The scientific novelty of the research lies in the development of a comprehensive methodological approach to employing digital twins specifically as a tool for automating testing and technical condition assessment of railway infrastructure facilities, taking into account real operational impacts and degradation mechanisms. The practical significance of the obtained results is associated with the transition from scheduled maintenance strategies to condition-based and predictive maintenance concepts. This transition contributes to reduced accident risks, optimized maintenance costs, improved infrastructure availability, and enhanced overall efficiency of railway transport systems in the context of Industry 4.0 and digital transformation.*

**Keywords:** transport, transport technologies, railway infrastructure, automation, testing, digital twins, technical condition.

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

**Черненко П.В.**

<https://orcid.org/0000-0003-0351-3111>

Національна академія Національної гвардії України

**Ніконенко А.М.**

<https://orcid.org/0009-0004-2261-7906>

Київський інститут Національної гвардії України

**Парій С.Г.**

<https://orcid.org/0009-0009-6601-0387>

Київський інститут Національної гвардії України

## СУЧАСНІ РУХОМІ РЕМОНТНІ МАЙСТЕРНІ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ – КЛЮЧ ДО ПЕРЕМОГИ У ВІЙНІ

*У статті здійснено комплексний аналіз розвитку рухомих ремонтних майстерень автобронетанкової техніки Національної гвардії України (НГУ) в період з 2014 року до сьогоднішнього дня. Актуальність дослідження зумовлена суттєвим зростанням застосування автобронетанкової техніки у виконанні службово-бойових та бойових завдань, а також забезпечення їх постійної технічної готовності безпосередньо в районах застосування підрозділів. Початок бойових дій у 2014 році виявив низку системних проблем у сфері технічного обслуговування та ремонту автобронетанкової техніки, що стало поштовхом до удосконалення та розвитку рухомих ремонтних майстерень.*

*Окрему увагу приділено проблемним питанням експлуатації застарілих рухомих ремонтних майстерень автобронетанкової техніки, зокрема моральному та фізичному зносу обладнання, обмеженості технічних можливостей та недостатньому рівню уніфікації. З'ясовано, що технічні характеристики майстерень технічного обслуговування та ремонту не відповідають тому об'єму робіт і завданням, які покладаються на рухомі ремонтні органи в сучасних умовах. Технологічне обладнання застаріло і не підходить для ремонту автомобілів та бойових машин в сучасних умовах. В комплексах цих майстерень відсутні прилади для контролю і регулювання параметрів сучасних зразків автобронетанкової техніки.*

*У роботі проаналізовано основні напрямки розвитку рухомих ремонтних майстерень з урахуванням досвіду бойових дій та сучасних вимог до оперативності відновлення автобронетанкової техніки.*

*Особливу увагу приділено конструктивним особливостям, технічним характеристикам, функціональним можливостям і рівню автономності сучасних ремонтних майстерень, а також їх можливості виконувати широкий спектр робіт з технічного обслуговування та ремонту автобронетанкової техніки, яку зараз використовують військові частини і підрозділи НГУ.*

*Подальший розвиток рухомих ремонтних майстерень автобронетанкової техніки сприятиме підвищенню ефективності транспортного забезпечення НГУ, зменшенню простоїв автобронетанкової техніки в ремонті та підвищенню оперативної мобільності підрозділів у сучасних умовах бойових дій.*

**Ключові слова:** Національна гвардія України, рухомі ремонтні майстерні, автобронетанкова техніка, технічне обслуговування, ремонт.

**Постановка проблеми.** В умовах ведення сучасних бойових дій роль технічної готовності автобронетанкової техніки є ключовим чинником забезпечення боєздатності військових частин і підрозділів. Інтенсивне застосування

автобронетанкової техніки, вплив вогневих уражень противника, складні кліматичні та дорожні умови призводять до значного зростання кількості бойових пошкоджень і експлуатаційних відмов. Це все негативно впливає на темп вико-

нання бойових завдань і рівень технічного забезпечення військ.

Особливо гостро є проблема скорочення часу між виявленням несправності та поверненням автобронетанкової техніки до строю, а це вимагає застосування сучасних мобільних засобів технічного обслуговування та ремонту.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення аналізу сучасних рухомих ремонтних майстерень автобронетанкової техніки, визначення їхніх технічних характеристик. Розв'язання цієї проблеми є важливою складовою підвищення ефективності системи технічного забезпечення та збереження боєздатності військових частин і підрозділів НГУ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В умовах ведення бойових дій питання відновлення автобронетанкової техніки в польових умовах протягом тривалого часу залишалися важливою складовою досліджень у галузі транспортних та військово-технічних наук.

У роботі [1] надано пропозиції щодо розробки та створення рухомої майстерні типу РАРМ (рухома автомобільна ремонтна майстерня) на базі продукції вітчизняних підприємств.

У роботі дослідника С. Патрика обґрунтовано необхідність створення принципово нових РЗТО та Р що будуть відповідати наявному парку техніки, характеру і способу ведення бойових дій [2].

Тому в умовах сьогодення, коли на озброєнні військових частин і підрозділів з'являються нові зразки автобронетанкової техніки, питання розробки та створення новітніх рухомих майстерень залишається вкрай необхідним і важливим.

**Постановка завдання.** Метою статті є порівняння застарілих рухомих ремонтних засобів автобронетанкової техніки радянського виробництва з сучасними та удосконаленими рухомими засобами ремонту, які є у підрозділах і військових частинах Національної гвардії України та активно використовуються як ключ до перемоги у війні.

**Виклад основного матеріалу.** У 2014-2015 роках експлуатація автобронетанкової техніки НГУ почала здійснюватись з високою інтенсивністю, що призводило до різкого зростання кількості відмов і пошкоджень. Значна частина техніки експлуатувалася в умовах, не передбачених заводськими нормами, з перевищенням міжсервісних пробігів та в складних дорожньо-кліматичних умовах. У цих умовах та з появою нових зразків автобронетанкової техніки виникла об'єктивна потреба у створенні нових зразків рухомих ремонтних засобів, здатних викону-

вати технічне обслуговування і ремонт сучасним обладнанням і інструментом.

Наведемо технічні характеристики і призначення рухомих ремонтних майстерень 70-80 років.

**Майстерня ремонтно-слюсарна МРС-АТ-М1** призначена для виконання розбирально-складальних, слюсарно-підгінних та інших робіт під час ремонту автомобільної техніки [3].

Обладнання майстерні дозволяє виконувати такі види робіт: розбирально-складальні, слюсарно-підгінні, підйомно-транспортні, електрозварювальні, малярні, оббивні, мастильно-заправні, мідницькі, бляхарські, столярні, заряджання і технічне обслуговування АБ, ремонт і регулювання приладів електрообладнання та системи живлення, ремонт деталей склеюванням.

Основним виробничим обладнанням майстерні є електросилова установка, перетворювач частоти струму, кран-стріла, слюсарні верстати з лещатами, зварювально-зарядна установка, прилад для перевірки автомобільного електрообладнання, намет П-20, опалювально-вентиляційна установка намету ОВ-95.

**Майстерня МРМ-М1** призначена для виконання ремонтно-механічних робіт при ремонті озброєння і техніки в складі ремонтних засобів [3].

Обладнання майстерні дозволяє виконувати токарні, фрезерні, шліфувальні, свердлильні, слюсарні, заточувальні та інші види робіт.

Майстерня має свій генератор трифазного змінного струму з приводом від двигуна базового автомобіля, що надає їй виробничу самостійність у виконанні робіт окремо від інших ремонтних засобів.

У майстерні передбачено одне робоче місце для токаря і два робочих місця для слюсарів.

**Рухомі майстерні МТО** призначені для технічного обслуговування і поточного ремонту автомобільної техніки.

МТО відносяться до групи не повністю уніфікованих майстерень, що оснащені єдиним обладнанням загального призначення і спеціалізованими комплектами технологічної оснастки [3].

До комплекту майстерень МТО-АТГ і МТО-40С, крім обладнання МТО-АТ, входять спеціалізовані комплекти інструменту і приладдя для обслуговування відповідно гусеничних машин або чотирирівсних автомобілів.

На заміну майстерень МРС-АТ-М1 та МРМ-М1, МТО-АТ прийшли на озброєння ремонтних підрозділів НГУ більш сучасні, удосконалені, маневрені, економічні рухомі ремонтні майстерні, технічні характеристики яких наведені нижче.

Таблиця 1

**Технічна характеристика майстерні МРС-АТ-М1**

| Шасі автомобіля                                                                      | ЗИЛ-131 з лебідкою і коробкою відбору потужності                                                                                                                                                                                                                        |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Електро-установка                                                                    | Генератор трифазного змінного струму потужністю 16 кВт, напругою 230 В частоти 50 Гц                                                                                                                                                                                    |             |
| Електро-забезпечення                                                                 | 1. Від власного генератора трифазного змінного електричного струму напругою 230 В частоти 50 Гц.<br>2. Від рухомих електростанцій з генераторами напругою 230 /400 В частоти 50 Гц<br>3. Від стаціонарних промислових енергосистем напругою 220 або 380 В частоти 50 Гц |             |
| Захист особового складу від ураження електричним струмом                             | Автоматичний                                                                                                                                                                                                                                                            |             |
| Встановлена потужність приймачів електричної енергії, кВт                            | 12,3                                                                                                                                                                                                                                                                    |             |
| Споживча потужність із врахуванням неодночасної роботи приймачів електроенергії, кВт | 7,1                                                                                                                                                                                                                                                                     |             |
| Кількість особового складу, який перевозиться в майстерні, осіб                      | 3                                                                                                                                                                                                                                                                       |             |
| Число робочих місць:                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                         |             |
| у кузові                                                                             | 3                                                                                                                                                                                                                                                                       |             |
| у наметі                                                                             | 3                                                                                                                                                                                                                                                                       |             |
| Час розгортання (згортання) майстерні силами трьох осіб, хв.                         | 30                                                                                                                                                                                                                                                                      |             |
| Габаритні розміри, мм                                                                | кузов КМ-131                                                                                                                                                                                                                                                            | кузов К-131 |
| довжина                                                                              | 7470                                                                                                                                                                                                                                                                    | 7450        |
| ширина                                                                               | 2450                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2400        |
| висота                                                                               | 3380                                                                                                                                                                                                                                                                    | 3365        |
| Маса майстерні в спорядженому стані (з особовим складом 3 особи), кг                 | 10400                                                                                                                                                                                                                                                                   | 10200       |

Таблиця 2

**Технічна характеристика майстерні МРМ-М1**

| Шасі базового автомобіля                                        | ЗИЛ-131 без лебідки з коробкою відбору потужності                                                                                                                                                                                                                 |       |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Електроустановка                                                | Генератор трифазного змінного струму потужністю 16 кВт, напругою 230 В частоти 50 Гц                                                                                                                                                                              |       |
| Електрозабезпечення                                             | 1. Від власного генератора трифазного змінного електричного струму напругою 230 В частоти 50 Гц.<br>2. Від рухомих електростанцій з генераторами напругою 230 В частоти 50 Гц.<br>Від стаціонарних промислових енергосистем напругою 220 або 380 В частоти 50 Гц. |       |
| Захист особового складу від ураження електричним струмом        | Автоматичний                                                                                                                                                                                                                                                      |       |
| Встановлена потужність приймачів електричної енергії, кВт       | 7,87                                                                                                                                                                                                                                                              |       |
| Кількість особового складу, який перевозиться в майстерні, осіб | 4                                                                                                                                                                                                                                                                 |       |
| Число робочих місць в кузові                                    | 3                                                                                                                                                                                                                                                                 |       |
| Час розгортання (згортання) майстерні силами трьох осіб, хв.    | 10                                                                                                                                                                                                                                                                |       |
| Габаритні розміри кузова, мм                                    | КМ-131                                                                                                                                                                                                                                                            | К-131 |
| довжина                                                         | 7330                                                                                                                                                                                                                                                              | 7310  |
| ширина                                                          | 2450                                                                                                                                                                                                                                                              | 2400  |
| висота                                                          | 3375                                                                                                                                                                                                                                                              | 3360  |
| Маса майстерні в спорядженому стані, кг                         | 10180                                                                                                                                                                                                                                                             | 9980  |

**Пересувна автомобільна ремонтна майстерня ПАРМ-2.01** призначена для виконання ПР і ТО військових автомобілів багатоцільового призначення, автомобілів народногосподарського призначення і гусеничних транспортів-тягачів багатоцільового призначення на готових агрегатах і деталях у польових умовах [4].

Майстерня ПАРМ-2.01 використовується в повному складі, а також може використовуватися

в виїзними ремонтними бригадами для виконання ремонту машин безпосередньо в районах виходу АБТТ із ладу.

Виїзні ремонтні бригади висилаються з комплектами спеціального інструменту, запасних частин, агрегатів і матеріалів.

Характер використання майстерні ПАРМ-2.01 визначається їх підпорядкованістю, бойовою обстановкою і наступними завданнями по відновленню пошкодженої АБТТ.

Технічна характеристика майстерні МТО-АТ

| Характеристика                             | З кузовом КМ 131                                                                                                                                | З кузовом К 131              |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Шасі автомобіля                            | ЗИЛ-131 з лебідкою                                                                                                                              |                              |
| Кузов (тип)                                | Каркасний металевий                                                                                                                             | Панелі армованого пінопласту |
| Габаритні розміри, мм:                     |                                                                                                                                                 |                              |
| довжина                                    | 7470                                                                                                                                            | 7450                         |
| ширина                                     | 2450                                                                                                                                            | 2400                         |
| висота                                     | 3280                                                                                                                                            | 3280                         |
| Внутрішні розміри кузова, мм:              |                                                                                                                                                 |                              |
| довжина                                    | 4000                                                                                                                                            | 4000                         |
| ширина                                     | 2250                                                                                                                                            | 2250                         |
| висота                                     | 1800                                                                                                                                            | 1800                         |
| Маса кузова, кг                            | 1600                                                                                                                                            | 1450                         |
| Маса майстерні у спорядженому стані, кг    | 9970                                                                                                                                            | 9830                         |
| Кількість робочих місць                    | 3                                                                                                                                               | 3                            |
| Кількість місць для відпочинку             | шість (чотири – на верстаках, два – на підвісних гамаках)                                                                                       |                              |
| Запас ходу, км:                            | 645                                                                                                                                             | 645                          |
| Вписування у залізничний габарит 02-Т      | Вписується з тиском повітря у шинах 0,5 кгс/см <sup>2</sup> (0,05 МПа)                                                                          |                              |
| Електропостачання приймачів електроенергії | Від генератора електросилової установки майстерні або від зовнішньої електричної мережі трифазного струму напругою 220 або 380 В частотою 50 Гц |                              |
| Система захисту від ураження струмом       | автоматична                                                                                                                                     |                              |

Виробничі можливості майстерні ПАРМ-2.01 за добу при 10-ти годинному робочому дні і штаті 10 чоловік складають 5-6 поточних ремонтів або, як виняток 1 середній ремонт.

ПАРМ-2.01 виконана на базі шасі автомобіля МАЗ-6317 (рис. 1).

Майстерня ПАРМ-2.01 розрахована на експлуатацію при температурі навколишнього повітря, від -35°C до +40°C.

#### Технічна характеристика ПАРМ-2.01:

1. Модель шасі МАЗ-6317-05; колісна формула 6х6; довжина (загальна) 10320 мм; ширина (загальна) 2550 мм; висота (загальна) 3920 мм.

2. Габаритні розміри встановленого кунгу-фургону, не більше: довжина 6920 мм; ширина 2500 мм; висота в транспортному положенні 2560 мм.

3. Трифазна мережа з ізолюваною 380±10% В; глухо заземленою нейтраллю напругою



Рис. 1. Пересувна автомобільна ремонтна майстерня ПАРМ-2.01

220±10% В; однофазна мережа напругою 220±10% В.

**Обладнання ПАРМ-2.01:**

Автономний опалювач (потужністю 4 кВт); генератор дизельний (потужністю 16 кВт); верстат точильно-шліфувальний; верстат токарний; верстат свердильний настільний; верстак двотумбовий; стелаж для інструменту та обладнання; стіл зварювальника; вулканізатор електричний; прес гідравлічний (10 т.); лещата; компресор; ящик для зарядки акумуляторних батарей; ящик для шанцевого інструменту; драбина.

**LOCKER – мобільна ремонтна майстерня** (рис. 2), призначена для обслуговування та ремонту колісної техніки в польових умовах, яка працює віддалено від своїх баз, автопарків чи автосервісів, наприклад, на дорожньому будівництві, на сільськогосподарських роботах, у військовій справі тощо [5]. Такі майстерні виготовляються на основі шасі пікапів (переважно підвищеної прохідності), на які встановлюється закритий кузов-фургон типу кунг, а також необхідне приладдя – вантажопідйомні засоби, джерела живлення, шиномонтажне та зварювальне обладнання, професійний ручний інструмент, освітлювальні прилади, пуско-зарядні пристрої та інше.

Майстерні не призначені для безпосереднього використання на полі бою, але дозволяють ремонтувати та евакуйовувати техніку в польових умовах, а також можуть використовуватись як невеликі електростанції (5,5 кВт) та компресорні станції (360 л/хв).

**Технічна характеристика ремонтної автомобільної майстерні LOCKER:**

**1. База:** переобладнаний пікап (наприклад, Mitsubishi L200, або інший кунг/шасі).

**2. Енергозабезпечення:**

- дизель-генератор (наприклад, 13 кВт);
- сонячна панель для зарядної станції;
- пуско-зарядний пристрій АКБ (з функцією швидкого старту);
- можливість підключення до зовнішньої мережі.

**3. Обладнання для шиномонтажу:**

- відкидний шиномонтажний стенд (для вантажних коліс);
- компресор (наприклад, 200 л);
- нагрівачі для прикипілих гайок.

**4. Інструментарій:** професійні ручні інструменти, набори для ремонту, зварювальний апарат, мультиметр.

**5. Діагностика:** мультимарковий сканер.

**6. Комфорт та безпека:** автономна система опалення та вентиляції, засоби індивідуальної захисту.

**7. Додатково:** кран-балка (у деяких моделях), спеціальні платформи для винесення генератора.

**Пересувна автотранспортна майстерня (ПАРМ) з евакуаційним обладнанням КрАЗ-6322 «Майстер»** призначена для технічного обслуговування і ремонту пошкодженої автомобільної та іншої техніки в польових умовах (рис. 3).

Автомобіль надійно працює в екстремальних природних, кліматичних і дорожніх умовах усіх континентів при температурі від -50°C до +60°C на висоті до 5 000 м над рівнем моря, долаючи водні перешкоди глибиною до 1,5 м і шар снігу до 0,6 м.



Рис. 2. Ремонтна автомобільна майстерня LOCKER





Рис. 3. Пересувна автотранспортна майстерня

**Технічна характеристика пересувної автотранспортної майстерні (ПАРМ) з евакуаційним обладнанням КраЗ-6322 «Майстер»:**

1. Базовий автомобіль КраЗ-6322.
2. Колісна формула 6х6.
3. Повна маса майстерні 16,1 т.
4. Спеціальне обладнання – кран-гідроманіпулятор Hiab, Palfinger.
5. Лебідка – гідравлічна, тягове зусилля 12 т.
6. Евакуаційний пристрій для буксування транспортних засобів ТР-9, вантажопідйомність 9000 кг.
7. Дизель-генератор, робоча потужність 8 (11) кВт (к.с.).
8. Повітряний компресор, потужність 3 кВт.

9. Спеціальне обладнання та інструмент для зварювальних, слюсарних та складально-розкладальних робіт.

**Пересувний польовий комплекс ПК-ЛБТ-02** виготовлений на універсальній платформі, уніфікований під міжнародний стандарт ISO 6346: 1995 для двадцяти футових контейнерів. Він складається з контейнеровоза з краном-маніпулятором на базі вантажного автомобіля підвищеної прохідності з колісною формулою 6х6, чотирьох модулів контейнерного типу зі змінюваною геометрією і об'ємом, двовісного причепа вантажопідйомністю 8 тон з дизель – генераторною установкою потужністю 40 кіловат, покриття тенту, електроустаткування, спеціальних пристосувань та

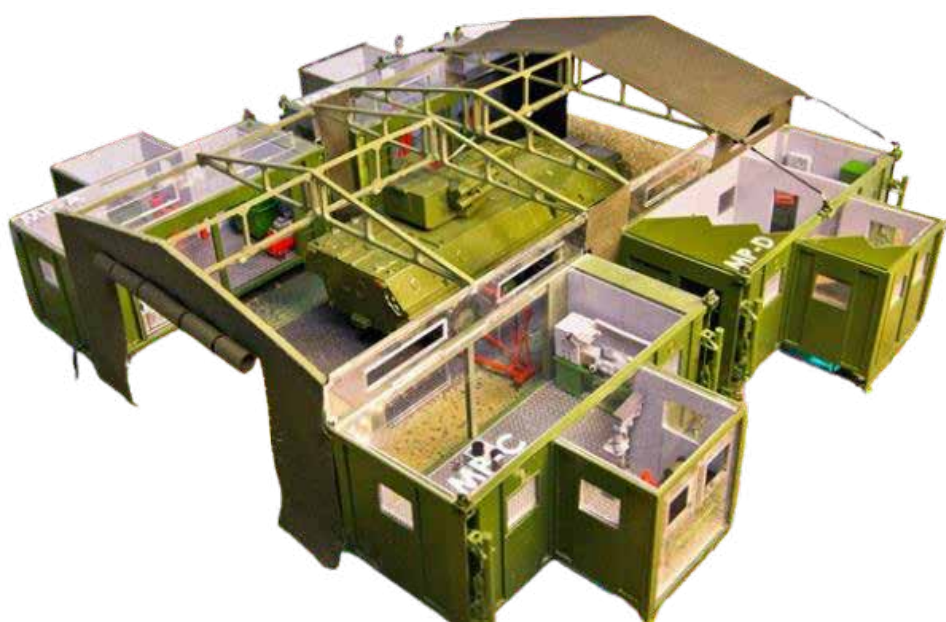


Рис. 4. Пересувний польовий комплекс ПК-ЛБТ-02

інструменту для військового ремонту бронетранспортерів типу БТР-70, БТР-80, БТР-3 і БТР-4. Кожен модуль польового комплексу обладнаний гідравлічною системою само навантаження/само розвантаження з контейнеровоза. Підйом і опускання здійснюється за допомогою гідроциліндрів як в ручному, так і в механічному режимі.

**Висновки.** Проведений аналіз розвитку рухомих ремонтних майстерень автобронетанкової техніки в НГУ показав, що їх створення та модернізація стали необхідною відповіддю на виклики бойових дій і суттєво підвищили мобільність

і боєздатність частин і підрозділів на полі бою.

Встановлено що сучасне обладнання і інструмент рухомих ремонтних майстерень охоплює широкий спектр робіт в районах застосування підрозділів.

Подальший розвиток рухомих ремонтних майстерень автобронетанкової техніки сприятиме підвищенню ефективності транспортного забезпечення НГУ, зменшенню простоїв автобронетанкової техніки в ремонті та підвищенню оперативної мобільності підрозділів у сучасних умовах бойових дій.

#### Список літератури:

1. Старцев В.В., Рогозін І.В., Литовченко Д.М. Перспективи створення сучасної рухомої автомобільної ремонтної майстерні вітчизняного виробництва. *Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків*, 2016. Вип. № 2 (46). С. 150–154. URL: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soivt/issue/archive/2>.
2. Патрика С. Рухомі засоби технічного обслуговування та ремонту техніки як основна складова системи ремонту. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: Військові та технічні науки*, 2024. Вип. № 4 (97). С. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.32453/3.v97i4.1602>.
3. Рухомі засоби технічного обслуговування і ремонту військової автомобільної техніки: Навчальний посібник. За ред. професора П.П. Ткачука. Львів : АСВ, 2011. 262 с.
4. Організація ремонту автобронетанкової техніки [Текст]: навч. посіб. / О.І. Шаповалов, Я.В. Павлов, П.В. Черненко, М.В. Склярів, В.М. Дем'янишин. Харків : НА НГ України, 2022. 367 с.
5. LOCKER конструкторське бюро. Український виробник мобільних ремонтних майстерень. URL: <https://locker.net.ua>

#### Chernenko P.V., Nikonenko A.M., Parii S.H. SUCHASNI RUKHOMI REPAIR MACHINERY OF ARMORED VEHICLES – THE KEY BEFORE VIYNI'S VICTORY

*The article presents a comprehensive analysis of the development of mobile repair shops for armored vehicles of the National Guard of Ukraine (NGU) from 2014 to the present. The relevance of the study is due to the significant increase in the use of armored vehicles in performing service and combat missions, as well as ensuring their constant technical readiness directly in the areas of operation of units. The beginning of hostilities in 2014 revealed a number of systemic problems in the field of maintenance and repair of armored vehicles, which became an impetus for the improvement and development of mobile repair workshops.*

*Special attention is paid to problematic issues of operating outdated mobile repair shops for armored vehicles, in particular, moral and physical wear and tear of equipment, limited technical capabilities, and an insufficient level of unification. It was found that the technical characteristics of maintenance and repair workshops do not correspond to the volume of work and tasks assigned to mobile repair bodies in modern conditions. The technological equipment is outdated and not suitable for repairing cars and combat vehicles in modern conditions. The kits of these workshops do not contain devices for monitoring and adjusting the parameters of modern armored vehicles.*

*The paper analyzes the main directions of development of mobile repair workshops, taking into account the experience of combat operations and modern requirements for the efficiency of the restoration of armored vehicles.*

*Particular attention is paid to the design features, technical characteristics, functionality and level of autonomy of modern repair shops, as well as their ability to perform a wide range of maintenance and repair work on armored vehicles currently used by military units and subdivisions of the National Guard.*

*Further development of mobile repair workshops for armored vehicles will contribute to increasing the efficiency of transport support for the National Guard, reducing downtime of armored vehicles for repair, and increasing the operational mobility of units in modern combat conditions.*

**Keywords:** National Guard of Ukraine, mobile repair workshops, armored vehicles, maintenance, repair.

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 656.07:656.025.4:339.5  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/51>

**Шпак Н.Г.**

<https://orcid.org/0000-0002-3765-1099>  
Одеський національний морський університет

**Літачевський В.В.**

<https://orcid.org/0009-0005-0112-9724>  
Одеський національний морський університет

## АНАЛІЗ РІВНЯ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКОГО СУПРОВОДУ МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖОПОТОКІВ

*У статті досліджено якість транспортно-експедиторського обслуговування міжнародних вантажопотоків у сучасних умовах розвитку транспортних технологій та глобалізації міжнародної торгівлі. Визначено роль транспортно-експедиторських компаній у формуванні ефективних логістичних ланцюгів та забезпеченні безперервності міжнародних перевезень. Проаналізовано основні підходи до оцінювання якості транспортно-експедиторських послуг, зокрема з урахуванням таких показників, як надійність доставки, дотримання термінів перевезення, інформаційне забезпечення, рівень сервісу та управління ризиками.*

*Визначено ключові критерії якості експедиторських послуг, проаналізовано основні чинники, що впливають на рівень сервісу в міжнародних перевезеннях, а також окреслено напрями підвищення ефективності транспортно-експедиторського обслуговування. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до оцінювання якості послуг із урахуванням часових, інформаційних, організаційних та ризикових показників.*

*Особливу увагу приділено впливу зовнішніх факторів, зокрема нестабільності міжнародних транспортних коридорів, зростання логістичних ризиків та ускладнення митно-формальних процедур, на якість експедиторського обслуговування. Обґрунтовано, що в умовах зростання конкуренції на ринку транспортно-логістичних послуг якість транспортно-експедиторського обслуговування стає ключовим чинником підвищення конкурентоспроможності учасників міжнародних вантажопотоків.*

*Запропоновано узагальнену систему показників оцінювання якості транспортно-експедиторського обслуговування міжнародних вантажопотоків, яка дозволяє комплексно враховувати технологічні, організаційні та сервісні аспекти перевезень. Результати дослідження можуть бути використані при вдосконаленні транспортних технологій, розробленні логістичних рішень та підвищенні ефективності діяльності транспортно-експедиторських компаній у сфері міжнародних перевезень.*

**Ключові слова:** транспортно-експедиторська діяльність, міжнародні вантажопотоки, якість обслуговування, логістика, митне оформлення, цифрові технології.

**Постановка проблеми.** Сучасні міжнародні вантажопотоки формуються в умовах динамічних змін світової економіки, ускладнення логістичних ланцюгів постачання та підвищених вимог клієнтів до швидкості, надійності й прозорості перевезень. У цих умовах транспортно-експедиторське обслуговування відіграє ключову роль у забезпеченні безперервності руху товарів між країнами та регіонами.

Зростання обсягів міжнародної торгівлі, розвиток мультимодальних перевезень і впровадження цифрових технологій зумовлюють необхідність

переосмислення підходів до оцінювання якості експедиторських послуг. Для вантажовласників важливими стають не лише вартісні параметри, а й дотримання строків доставки, коректність документального супроводу, рівень комунікації та здатність експедитора мінімізувати логістичні ризики.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження якості транспортно-експедиторського обслуговування міжнародних вантажопотоків та визначення шляхів її підвищення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання забезпечення якості транспортно-екс-

педиторського обслуговування міжнародних вантажопотоків широко висвітлюються в наукових працях, присвячених сервісній якості логістики, організації міжнародних перевезень та управлінню ланцюгами постачання. У роботах вітчизняних і зарубіжних дослідників якості транспортно-експедиторських послуг розглядається як багатовимірна категорія, що охоплює техніко-технологічні, організаційні, інформаційні та сервісні характеристики логістичних процесів [1–3].

Значна група наукових публікацій присвячена формуванню та застосуванню систем показників оцінювання якості логістичних і транспортно-експедиторських послуг. У цих дослідженнях обґрунтовується доцільність використання багатокритеріальних методів оцінювання, які враховують надійність доставки, дотримання термінів перевезення, рівень сервісу, гнучкість логістичних рішень та задоволеність клієнтів [4–6].

Окремий напрям становлять праці, у яких досліджується вплив митних процедур та документального супроводу на якість експедиторського обслуговування в міжнародних перевезеннях. Автори наголошують на значущості швидкості митного оформлення, прозорості процедур та гармонізації митного законодавства з міжнародними стандартами як чинників підвищення ефективності логістичних процесів [7–9].

У сучасних дослідженнях значну увагу приділено ролі цифрових технологій у підвищенні якості транспортно-експедиторського обслуговування. Зокрема, аналізується впровадження електронного документообігу, систем відстеження вантажів, логістичних платформ та цифрових сервісів взаємодії учасників міжнародних вантажопотоків [10–12].

Водночас у низці публікацій підкреслюється зростання впливу зовнішніх факторів, зокрема нестабільності міжнародних транспортних коридорів, логістичних ризиків і ускладнення митно-формальних процедур, що потребує адаптації існуючих методик оцінювання якості експедиторських послуг до умов підвищеної невизначеності [13, 14].

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження якості транспортно-експедиторського обслуговування міжнародних вантажопотоків з урахуванням сучасних умов функціонування транспортних технологій, а також обґрунтування підходів до оцінювання рівня сервісу та визначення напрямів підвищення ефективності діяльності транспортно-експедиторських компаній у сфері міжнародних перевезень.

**Виклад основного матеріалу.** Транспортно-експедиторське обслуговування охоплює комплекс організаційних, інформаційних, транспортних та митних операцій, спрямованих на забезпечення доставки вантажів від відправника до одержувача. Якість такого обслуговування визначається здатністю експедитора виконувати взяті зобов'язання відповідно до умов договору та очікувань клієнта.

У наукових дослідженнях якість експедиторських послуг розглядається як багатокомпонентна категорія, що включає:

- надійність перевезень;
- дотримання термінів доставки;
- точність і повноту транспортно-митної документації;
- оперативність інформаційного супроводу;
- гнучкість у вирішенні нестандартних ситуацій.

Особливістю міжнародних перевезень є залежність якості обслуговування від зовнішніх факторів: митного контролю, регуляторних вимог різних країн, пропускнуої спроможності портів і прикордонних переходів, а також політичних і економічних ризиків.

Для об'єктивного оцінювання якості транспортно-експедиторського обслуговування доцільно застосовувати систему критеріїв, яка охоплює всі етапи логістичного ланцюга (рис. 1).

До основних критеріїв належать часові показники, документальна точність, інформаційна прозорість, надійність та безпека та рівень сервісу.

Застосування зазначених критеріїв дозволяє комплексно оцінити ефективність експедиторської діяльності та виявити проблемні зони.

На основі проведеного дослідження можна визначити такі основні напрями підвищення якості експедиторських послуг:

- стандартизація внутрішніх процесів експедиторських компаній;
- підвищення кваліфікації персоналу у сфері митного та транспортного законодавства;
- активне впровадження цифрових рішень;
- розвиток партнерських відносин із перевізниками, терміналами та митними органами;
- застосування системи показників ефективності (KPI) для контролю якості обслуговування.

Реалізація зазначених заходів сприятиме підвищенню надійності міжнародних перевезень та зростанню довіри з боку вантажовласників.

Для комплексної оцінки якості митно-експедиторського обслуговування міжнародних вантажопотоків у дослідженні використовується інте-





Рис. 1. Основні критерії оцінювання якості транспортно-експедиторського обслуговування

гральний показник, який дозволяє узагальнити вплив окремих критеріїв на загальний рівень якості сервісу. Інтегральний показник якості митно-експедиторського обслуговування визначається як **зважена сума нормалізованих часткових показників**, що характеризують основні етапи митно-експедиторського супроводу вантажу, відповідно до формули:

$$I_{ME} = \sum_{i=1}^n w_i * K_i \quad (1)$$

де:  $I_{ME}$  – інтегральний показник якості митно-експедиторського обслуговування;

$K_i$  – нормалізований показник якості за  $i$ -тим критерієм;

$w_i$  – ваговий коефіцієнт значущості  $i$ -того критерію, що відображає його відносний внесок у загальну оцінку якості;

$n$  – кількість критеріїв оцінювання;

Вагові коефіцієнти визначаються таким чином, щоб виконувалася умова нормування:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

що забезпечує коректність агрегування часткових показників і дозволяє інтерпретувати інтегральний показник у межах від 0 до 1.

Застосування зваженої суми нормалізованих показників дає змогу врахувати різну значущість окремих критеріїв (часових, документальних, інформаційних, безпекових та сервісних) для кінцевого результату митно-експедиторського обслу-

говування. Значення інтегрального показника  $I_{ME}$ , близьке до 1, свідчить про високий рівень якості обслуговування, тоді як його зменшення вказує на наявність проблемних елементів у процесі митно-експедиторського супроводу вантажу.

Таким чином, запропонований інтегральний показник створює універсальний інструмент для порівняльного аналізу якості митно-експедиторського обслуговування різних операторів або логістичних схем та може бути використаний для обґрунтування управлінських рішень щодо підвищення ефективності транспортно-експедиторських послуг.

Для підвищення аналітичної обґрунтованості інтегрального показника якості митно-експедиторського обслуговування та забезпечення можливості деталізованого аналізу окремих етапів митного супроводу вантажів у дослідженні запропоновано групування часткових показників у три функціональні блоки критеріїв. Такий підхід відповідає логіці проходження вантажу через митно-експедиторський процес і дозволяє оцінити якість обслуговування на кожному його етапі (рис. 2).

Блок 1. Якість підготовки митної документації ( $w_1 = 0,35$ )

Перший функціональний блок характеризує підготовчий етап митно-експедиторського обслуговування, від якого значною мірою залежить подальша ефективність митного оформлення. До цього блоку включено показники, що відображають коректність і повноту документального супроводу вантажу:



Рис. 2. Інтегральний показник якості транспортно-експедиторського обслуговування

•  $K_1$  – частка митних декларацій, оформлених без коригувань, що свідчить про точність первинного декларування;

•  $K_2$  – відповідність заявлених кодів УКТ ЗЕД та митної вартості фактичним характеристикам товару;

•  $K_3$  – повнота пакету дозвільних та супровідних документів, необхідних для митного оформлення.

Ваговий коефіцієнт блоку ( $w_1 = 0,35$ ) обґрунтований тим, що помилки на етапі підготовки митної документації призводять до затримок, застосування додаткових форм митного контролю та зростання витрат учасників зовнішньоекономічної діяльності.

Блок 2. Ефективність митного контролю та оформлення ( $w_2 = 0,40$ )

Другий блок є ключовим у структурі інтегрального показника, оскільки відображає **безпосередній процес митного контролю та оформлення вантажу**. До нього включено такі показники:

•  $K_4$  – середній час митного оформлення вантажу, що характеризує оперативність митних процедур;

•  $K_5$  – кількість застосованих форм митного контролю, яка відображає рівень ризиковості операції;

•  $K_6$  – частота призупинень митного оформлення, що негативно впливає на дотримання строків доставки.

Найбільша вагомість цього блоку ( $w_2 = 0,40$ ) пояснюється тим, що саме на етапі митного

контролю формуються основні часові та фінансові втрати, а також виникають ключові ризики порушення логістичних графіків.

Блок 3. Післямитний супровід та транзитні процедури ( $w_3 = 0,25$ )

Третій функціональний блок охоплює **завершальний етап митно-експедиторського обслуговування**, пов'язаний із коректністю закриття митних режимів та транзитних процедур. До цього блоку належать:

•  $K_7$  – своєчасність закриття транзитних процедур типу Т1;

•  $K_8$  – відсутність штрафних санкцій та порушень митних правил;

•  $K_9$  – коректність завершення митного режиму (реекспорт, імпорт або інший митний режим).

Ваговий коефіцієнт блоку ( $w_3 = 0,25$ ) зумовлений меншою частотою виникнення післямитних проблем порівняно з етапом митного оформлення, однак їх високою фінансовою та репутаційною значущістю для суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності.

Запропонована блокова структура інтегрального показника дозволяє комплексно оцінити якість митно-експедиторського обслуговування міжнародних вантажопотоків, забезпечує логічну узгодженість критеріїв із етапами митного процесу та створює аналітичну основу для виявлення проблемних зон і обґрунтування управлінських рішень щодо підвищення ефективності транспортно-експедиторських послуг.

Для забезпечення порівнянності різнорідних показників якості транспортно-експедиторського обслуговування, які мають різні одиниці вимірювання та масштаби значень, у дослідженні застосовується метод лінійної нормалізації. Суть цього методу полягає у приведенні всіх показників до безрозмірного вигляду в інтервалі від 0 до 1, що дозволяє здійснювати їх подальше агрегування та порівняльний аналіз.

У випадку показників, для яких більше значення відповідає кращій якості обслуговування (наприклад, рівень виконання договірних зобов'язань або точність оформлення документації), нормалізація здійснюється за формулою:

$$K_i = \frac{X_i}{X_i^{max}} \quad (2)$$

де  $X_i$  – фактичне значення  $i$ -го показника, а  $X_i^{max}$  – нормативне або максимально допустиме значення відповідного показника. У результаті нормалізації значення  $K_i$  наближається до 1 у разі досягнення або наближення фактичного показника до нормативного рівня.

Для показників, у яких менше значення є кращим (зокрема, час митного оформлення, тривалість обробки вантажу або кількість затримок), застосовується альтернативна форма лінійної нормалізації за формулою:

$$K_i = \frac{X_i^{min}}{X_i} \quad (3)$$

де  $X_i^{min}$  – фактичне мінімально допустиме або еталонне значення показника. Такий підхід забезпечує зростання нормалізованого показника  $K_i$  у разі зменшення фактичного значення  $X_i$ , що коректно відображає підвищення якості обслуговування.

Застосування методу лінійної нормалізації дозволяє сформувати уніфіковану систему оцінювання якості транспортно-експедиторського обслуговування та створює методичну основу для подальшого розрахунку інтегрального показника якості з урахуванням вагомості окремих критеріїв.

**Висновки.** Якість транспортно-експедиторського обслуговування є визначальним фактором ефективності міжнародних вантажопотоків. У сучасних умовах вона формується під впливом організаційних, інформаційних, технологічних та регуляторних чинників. Дослідження показало, що комплексний підхід до оцінювання якості експедиторських послуг та активне використання цифрових технологій дозволяють істотно підвищити рівень сервісу та конкурентоспроможність експедиторських компаній.

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на розробку інтегрованих моделей оцінювання якості транспортно-експедиторського обслуговування з урахуванням специфіки окремих видів міжнародних перевезень.

#### Список літератури:

1. Ковальчук О. В. Транспортні технології у міжнародних перевезеннях. Львів : ЛПНУ, 2020. 312 с.
2. Шпак Н.Г. Дослідження впливу інтеграції на показники учасників міжнародної економічної системи. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2018. № 4 (65). С. 134–149. DOI: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2018-4-134-149>
3. Крикавський Є. В., Чернописька Н. В. Логістика та управління ланцюгами постачання. Львів : ЛПНУ, 2018. 456 с.
4. Christopher M. Logistics and Supply Chain Management. 5th ed. Harlow : Pearson Education, 2016. 312 p.
5. Grant D. B., Wong C. Y., Trautrim A. Sustainable Logistics and Supply Chain Management. London : Kogan Page, 2017. 408 p.
6. Widdowson D. Managing risk in the international supply chain. *World Customs Journal*. 2010. Vol. 4, No. 2. P. 3–15.
7. World Customs Organization. SAFE Framework of Standards. Brussels : WCO, 2021.
8. UNCTAD. Review of Maritime Transport 2023. Geneva : United Nations, 2023.
9. Єфименко О. М. Митне регулювання міжнародних перевезень вантажів. *Економіка та держава*. 2021. № 6. С. 45–49.
10. OECD. Digital Transformation of Logistics. Paris : OECD Publishing, 2020.
11. Шпак Н.Г. Визначення конкурентоспроможності учасників міжнародної економічної системи з урахуванням митного чинника. *Бізнес-інформ*. 2018. № 12 (491). С. 149–155
12. Acciaro M. et al. Digital transformation in transport and logistics. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. P. 1–10.
13. McKinsey & Company. Digital Logistics: Technology Trends. 2022.
14. Notteboom T., Pallis A. Port resilience in times of crisis. *Maritime Economics & Logistics*. 2021. Vol. 23. P. 1–17.



**Shpak N.G., Litachevskiy V.V. ANALYSIS OF THE QUALITY LEVEL OF FREIGHT FORWARDING SUPPORT FOR INTERNATIONAL CARGO FLOWS**

*The article examines the quality of freight forwarding and transport services for international cargo flows under current conditions of transport technology development and the globalization of international trade. The role of freight forwarding companies in the formation of efficient logistics chains and ensuring the continuity of international transportation is identified. The main approaches to assessing the quality of freight forwarding services are analyzed, taking into account such indicators as delivery reliability, compliance with transportation deadlines, information support, service level, and risk management.*

*Key criteria for the quality of freight forwarding services are determined, the main factors influencing the level of service in international transportation are analyzed, and directions for improving the efficiency of freight forwarding and transport services are outlined. The necessity of a comprehensive approach to service quality assessment is substantiated, considering time-related, informational, organizational, and risk-related indicators.*

*Special attention is paid to the impact of external factors, including the instability of international transport corridors, the growth of logistics risks, and the complication of customs and formal procedures, on the quality of freight forwarding services. It is substantiated that under conditions of increasing competition in the transport and logistics services market, the quality of freight forwarding and transport services becomes a key factor in enhancing the competitiveness of participants in international cargo flows.*

*A generalized system of indicators for assessing the quality of freight forwarding and transport services in international cargo flows is proposed, which allows for a comprehensive consideration of technological, organizational, and service-related aspects of transportation. The research results can be used to improve transport technologies, develop logistics solutions, and enhance the operational efficiency of freight forwarding companies in the field of international transportation.*

**Keywords:** *freight forwarding activities, international cargo flows, service quality, logistics, customs clearance, digital technologies.*

Дата першого надходження статті до видання: 24.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

# БУДІВНИЦТВО

УДК 624.042.7:620.179.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/52>**Гусєв Р.О.**<https://orcid.org/0009-0004-5620-6048>

Національний університет «Одеська морська академія»

**Маліков С.Д.**<https://orcid.org/0009-0008-4903-2384>

Національний університет «Одеська морська академія»

## ПРОГНОЗУВАННЯ РУЙНУВАННЯ БЕТОННИХ ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ДІЄЮ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ОСНОВІ БЕЗРОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ

У статті розглянуто аналітичний підхід до оцінювання локального руйнування бетонних конструкцій під дією вибухових навантажень, орієнтований на інженерне застосування та швидку прогностичну оцінку стійкості захисних елементів. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до вибухостійкості споруд спеціального призначення, а також обмеженими можливостями використання повномасштабних експериментів і ресурсоемного чисельного моделювання на ранніх етапах проєктування. У роботі узагальнено сучасні експериментальні та чисельно-аналітичні результати досліджень контактних у бетонних плитах та показано, що наявні підходи часто мають обмежену область застосування або потребують використання різних критеріїв для окремих режимів руйнування. Запропоновано узагальнену аналітичну модель, побудовану на основі безрозмірних параметрів, що враховують масу вибухової речовини, товщину бетонної плити та міцність бетону. Модель дозволяє в єдиній постановці визначати прогнозовану глибину пошкодження та ідентифікувати характер локального руйнування – кратерування, тильне відколювання або перфорацію – без залучення чисельних методів. Аналітичні залежності сформульовано у формі, придатній для масштабування результатів і порівняння даних, отриманих у різних експериментальних серіях. Достовірність підходу перевірено шляхом зіставлення розрахункових значень глибини пошкодження з опублікованими експериментальними результатами, що показало задовільну узгодженість у широкому діапазоні параметрів. Практичну реалізацію методики продемонстровано на прикладі інженерного розрахунку бетонної плити для заданої маси заряду та класу бетону з визначенням режиму руйнування на основі порівняння прогнозованої глибини пошкодження з товщиною конструкції. Отримані результати створюють підґрунтя для застосування запропонованої моделі як інструменту експрес-оцінки вибухостійкості бетонних елементів і визначення мінімальної товщини конструкцій, що забезпечує збереження функціональної цілісності після вибухового впливу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення підходу для залізобетонних конструкцій, інших типів вибухових впливів та уточнення критеріїв переходу між режимами руйнування на основі розширеної експериментальної бази.

**Ключові слова:** локальне руйнування, вибух у контакт, міцність бетону, аналітичне моделювання, режими руйнування, захисні споруди.

**Постановка проблеми.** Зростання частоти локальних техногенних аварій та руйнувань спричинених вибуховою дією, в тому числі, як наслідки війни, останніми роками актуалізувало проблему забезпечення вибухостійкості буди-

вельних та інженерних конструкцій, особливо тих, що виконують захисні функції – командних пунктів, енергетичних об'єктів, різного роду сховищ, зокрема сховищ зберігання джерел іонізуючого випромінювання або вибухових матеріалів.

Бетон, що використовується як один із найбільш розповсюджених конструкційних матеріалів, демонструє складну нелінійну поведінку при дії високошвидкісних імпульсів тиску, що супроводжуються ударними хвилями, розповсюдженням тріщин і локальними зонами руйнування.

Наразі сучасні підходи до аналізу вибухових впливів на бетонні споруди можна поділити на три основні групи:

- емпіричні моделі, що базуються на експериментах та апроксимації результатів спостережень;
- чисельні моделі, в яких застосовані кінцево-елементні або гідродинамічні методи для моделювання тривимірного процесу вибуху;
- аналітичні моделі, які спрямовані на спрощене, але фізично обґрунтоване

описання основних етапів руйнування з мінімальним числом вхідних параметрів.

Попри те, що комп'ютерне моделювання зробило великий крок уперед, інженери досі надають перевагу перевіреним формулам для швидкої оцінки. Їх перевага полягає у можливості швидкої оцінки порогових станів – визначення, чи відбудеться лише поверхневе кратерування, часткове відколювання або повна перфорація бетонної плити під дією вибуху певної потужності.

Проте у більшості існуючих формул є суттєвий недолік: вони не дозволяють об'єднати силу вибуху, міцність бетону та геометричні характеристики споруди в одну зрозумілу систему. Крім того, наразі досі бракує «універсальної формули». Через це результати, отримані на маленьких макетах у лабораторії, не можна просто так перенести на реальні великі об'єкти – доводиться щоразу робити складні додаткові перерахунки та «підгонки».

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження руйнування бетонних конструкцій під впливом вибухових навантажень охоплюють як експериментальні випробування, так і чисельне моделювання та аналітичні підходи. Загалом можна виділити кілька напрямів: дослідження впливу маси заряду та геометрії плити на режими руйнування [1–3], вивчення ролі матеріальної модифікації (волокна, покриття, високоміцний бетон) [4–6], а також спроби формулювання узагальнених критеріальних залежностей [7–9].

У [1] автори представили аналітичне дослідження впливу контактної заряду на бетонну плиту, виокремивши режими кратерування, відколювання (спалювання тильної поверхні) та перфорації; запропоновано безрозмірний параметр

навантаження і перевірено його на серії експериментів. У [2] виконано чисельні дослідження армованих бетонних плит під дією контактних вибухів, зосереджені на товщині плити та коефіцієнті армування як ключових параметрах. Робота [3] показала розмірний ефект (size-effect) для бетонних плит під прямим контактним вибухом, коли при збільшенні площі плити та товщини змінюється характер руйнування. У [4] продемонстровано, що сталеві волокна в бетоні значно підвищують стійкість до відколювання (spall) при вибухах, водночас точні формули порогу залишалися непропрацьованими. У [5] розглянуто поведінку плит із металевим гофрованим покриттям під вибухом, причому встановлено, що додаткові шари можуть змінити характер руйнування із перфорації на поверхневе ушкодження. У [6] вивчено ультрависокоміцний бетон (УНПС), який показав значно вищий поріг руйнування при контактному вибуху – проте в роботі не виокремлено аналітичну залежність між товщиною плити, масою заряду і матеріалом. У [7] здійснено оглядову аналітику з моделювання спалювання бетону під вибуховими навантаженнями, але без чіткого розділення трьох режимів руйнування. У [8] запропоновано методику вимірювання глибини відколювання у плитах, але не інтегровано її в систему порогових залежностей із масою заряду. У [9] представлено чисельне дослідження перфорації бетонної плити під близьким вибухом з фрагментацією матеріалу, але без узагальнення на різні матеріали та геометрії.

Незважаючи на значний обсяг робіт, виникає декілька суттєвих прогалин. По-перше, більшість моделей фокусуються або на режимі відколювання або перфорації, але не на трьох режимах (кратерування, відколювання, перфорація) одночасно. По-друге, недостатньо представлено універсальних безрозмірних формул, які б пов'язували масу заряду, товщину плити та міцність матеріалу в одному вигляді, придатному для широкого діапазону матеріалів. По-третє, для інженерних оцінок часто відсутні чіткі алгоритми, які дозволяють за заданою масою заряду визначити мінімальну товщину плити або навпаки – за заданою товщиною визначити допустиму масу заряду. Таким чином, є потреба у розробці аналітичної моделі, здатної виконувати ці завдання, та інтегрувати її в інженерний алгоритм.

**Постановка завдання.** Метою статті є – створення аналітичної моделі та алгоритму для прогнозування режимів руйнування бетонних конструкцій під дією вибухових навантажень різної

інтенсивності, з урахуванням властивостей матеріалу та параметрів вибуху, з подальшим застосуванням для оцінки стійкості захисних споруд і сховищ.

Для досягання поставленої цілі були сформувані наступні задачі:

- проаналізувати сучасні моделі руйнування бетону під дією вибуху, зокрема експериментально-чисельні результати і визначити їхні аналітичні основи;

- побудувати безрозмірні залежності між енергією вибуху, геометрією заряду та міцністю бетону, що описують три режими руйнування: кратерування, відколювання, перфорацію;

- вивести робочі формули та узагальнити їх у вигляді інженерного алгоритму, придатного для швидкої оцінки порогів руйнування без застосування чисельного моделювання;

- провести калібрування та перевірку моделі за експериментально-чисельні результатами, проаналізувати відмінності та чинники похибок.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Поведінка бетонних конструкцій під дією вибуху є складним динамічним процесом, що поєднує короточасні імпульсні навантаження, ударно-хвильові явища, інерційні ефекти та крихке руйнування матеріалу. Для адекватного опису цих процесів необхідно враховувати миттєвий характер дії, просторову неоднорідність напружень і нелінійну залежність міцності бетону від швидкості деформації.

В основі сучасних аналітичних методів лежить використання безрозмірних параметрів, які дають можливість порівнювати результати для різних типів зарядів, матеріалів та масштабів. Одним із базових параметрів є еквівалентний радіус заряду, що визначає характерну геометричну шкалу процесу (1):

$$a = \left( \frac{3m}{4\pi\rho} \right)^{1/3} \quad (1)$$

де:  $m$  – маса вибухового заряду, кг;

$\rho$  – густина вибухової речовини, кг/м<sup>3</sup>;

$a$  – еквівалентний радіус заряду, м.

Величина  $a$  використовується для нормування просторових координат і товщини конструкцій, дозволяючи перейти від конкретних геометричних розмірів до універсальних безрозмірних співвідношень.

Іншим ключовим параметром є безрозмірний показник інтенсивності навантаження, який характеризує співвідношення між енергією вибуху та опором матеріалу (2):

$$\xi = \frac{1.3 \cdot \eta \cdot Q_v \cdot \delta \cdot m}{\pi \cdot \tau_s \cdot a^3} \quad (2)$$

де:  $\eta$  – коефіцієнт ефективності вибуху (0–1);

$Q_v$  – питома теплота вибуху, Дж/кг;

$\delta$  – коефіцієнт геометричної взаємодії між зарядом і конструкцією;

$\tau_s$  – межа міцності бетону на розтяг, Па;

$a$  – еквівалентний радіус заряду, м.

Параметр  $\xi$  дозволяє оцінити ступінь впливу вибухового навантаження та визначає межі переходу між різними режимами руйнування. При малих значеннях  $\xi$  конструкція зазнає поверхневого пошкодження (кратерування), при середніх – відколювання шару бетону, а при великих – повної перфорації (рисунк 1).

Аналіз експериментальних і чисельних досліджень показує, що характер руйнування бетону суттєво залежить від маси заряду, відстані до поверхні та механічних властивостей матеріалу. Зі збільшенням маси заряду або зменшенням товщини конструкції спостерігається закономірний перехід від локального відколювання до наскрізного пробиття. Залежність між глибиною руйнування та масою заряду виявляє степеневий характер, що є типовим для процесів, у яких діє масштабний закон  $W^{1/3}$ .

**Побудова безрозмірних залежностей між енергією вибуху та міцністю бетону.**

Подальший розвиток аналітичної моделі базується на безрозмірних параметрах  $a$  та  $\xi$ , визначених у попередньому підрозділі (формули (1)–(2)). Використання цих величин дозволяє описати вплив енергії вибуху та міцності матеріалу через узагальнені залежності, незалежні від абсолютних розмірів конструкції. Такий підхід забезпечує універсальність отриманих результатів і можливість масштабування для зарядів різної маси та умов взаємодії.

На основі енергетичного балансу між роботою вибуху та роботою деформації матеріалу вводиться **безрозмірна глибина зони пошкодження**  $\tilde{R}$ , що визначає відносний розмір області руйнування відносно еквівалентного радіуса заряду (3):

$$\tilde{R} = \frac{R}{a}, \quad (3)$$

де:  $R$  – фактичний радіус (або глибина) пошкодженої області, м;

$a$  – еквівалентний радіус заряду, м.

Встановлено, що між параметрами  $\tilde{R}$  та  $\xi$  існує нелінійна залежність, яка описує зростання об'єму зони руйнування зі збільшенням енергії вибуху (4):

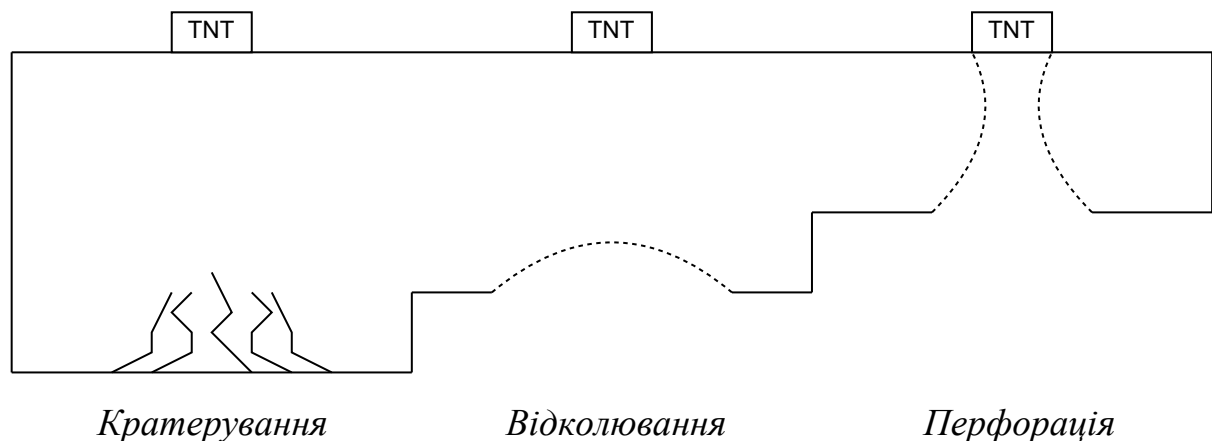


Рис. 1. Схема режимів руйнування

$$\tilde{R}^3 - \ln(\tilde{R}) = \xi \quad (4)$$

Рівняння (4) визначає основну закономірність переходу від локальних поверхневих пошкоджень до наскрізних руйнувань. Для малих значень  $\xi$  (низькі енергії або висока міцність бетону) зона руйнування обмежується поверхнею. Зі зростанням  $\xi$  глибина пошкодження збільшується, а при досягненні критичного значення  $\xi_{кр}$  відбувається перехід до наскрізної перфорації.

Для спрощення практичного використання рівняння (4) може бути представлено в аналітичній формі через **функцію Ламберта**  $W$ . Після перетворення вираз набуває вигляду (5):

$$\tilde{R} = \exp\left[\frac{1}{3}W(3\xi)\right] \quad (5)$$

де  $W(x)$  – функція Ламберта, яка задовольняє рівняння  $We^W = x$ .

Цей запис дає можливість швидко обчислювати відносну глибину пошкодження без використання чисельних методів або складних ітерацій.

Параметри  $\xi$  та  $\tilde{R}$  визначають не лише енергетичний стан системи, а й межі між різними режимами руйнування. При малих значеннях  $\xi$  ( $\xi < \xi_1$ ) руйнування має поверхневий характер (кратерування). У діапазоні  $\xi_1 < \xi < \xi_2$  реалізується відколювання шару бетону, а при  $\xi > \xi_2$  – повна перфорація елемента. Межі  $\xi_1$  та  $\xi_2$  визначаються за експериментальними даними і є критичними точками переходу між режимами.

Отримані залежності (3)–(5) становлять основу подальшого формування робочих формул, придатних для інженерної оцінки стійкості бетонних конструкцій до вибухових навантажень. Вони забезпечують перехід від узагальнених енергетичних характеристик до кількісних оцінок руйнування, що розглядаються у наступному підрозділі.

### Режими руйнування: кратерування, відколювання та перфорація.

Режим кратерування (рисунок 2) реалізується при відносно малих значеннях параметра  $\xi$ , коли енергії вибуху недостатньо для формування наскрізних тріщин або відриву шару матеріалу. Руйнування обмежується поверхневою зоною, де відбувається інтенсивне дроблення та викид фрагментів бетону.

Для цього режиму глибина пошкодження (кратерування)  $L_{кр}$  може бути представлена у вигляді (6):

$$L_{кр} = k_1 a \tilde{R} \quad (6)$$

де:  $k_1$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує геометрію контакту заряду з поверхнею (для контактного підриву  $k_1 \approx 0.9$ );

$a$  – еквівалентний радіус заряду, м;

$\tilde{R}$  – безрозмірний радіус зони пошкодження, визначений за формулою (5).

Залежність (6) описує локальне поверхнєве руйнування без втрати несучої здатності елемента. Кратерування супроводжується відривом дрібних фрагментів і утворенням заглиблення кінчної форми.

Режим відколювання (рисунок 3) спостерігається при зростанні інтенсивності навантаження ( $\xi_1 < \xi < \xi_2$ ), коли вибухова хвиля, відбиваючись від вільної поверхні, створює розтягальні напруження, що перевищують межу міцності бетону.

Руйнування проявляється у вигляді відриву шару матеріалу на протилежній від вибуху стороні конструкції. Глибина відколювання  $L_{від}$  визначається співвідношенням (7):

$$L_{від} = k_2 a \tilde{R}^{\beta_1} \quad (7)$$

де:  $k_2$  – узагальнений коефіцієнт, що враховує тип бетону та умови завантаження (типово 2.0–2.5);



Рис. 2. Режим кратерування

Джерело: [1]



Рис. 3. Режим відколювання

Джерело: [1]

$\beta_1$  – показник степеня, який описує нелінійність росту зони руйнування ( $\beta_1 \approx 1.1-1.3$ );

$a$ ,  $\tilde{R}$  – як у попередніх формулах.

Ця залежність узагальнює результати чисельних і експериментальних спостережень, показуючи, що глибина відколювання зростає повільніше, ніж кубічно зі збільшенням параметра  $\xi$ .

Перфорація бетонної конструкції (рисунок 4) спостерігається при значних значеннях параметра  $\xi > \xi_2$ , коли зона руйнування охоплює всю товщину елемента.

У цьому випадку відбувається наскрізне пробиття з утворенням вихідного кратера на тильній поверхні. Глибина перфорації  $L_{\text{перф}}$  визначається виразом (8):

$$L_{\text{перф}} = k_3 a \tilde{R}^{\beta_2}, \quad (8)$$

де:  $k_3$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує контактну умову вибуху (1.8–2.7);

$\beta_2$  – показник, який описує інтенсивність росту зони руйнування при переході до наскрізного пробиття ( $\beta_2 \approx 1.5$ );

$a$ ,  $\tilde{R}$  – як у попередніх формулах.

Відмінною особливістю цього режиму є повна втрата несучої здатності конструкційного елемента та порушення його герметичності. Параметр  $L_{\text{перф}}$  у подальших розрахунках використовується як **критерій граничного стану**, що визначає стійкість захисних споруд до вибухових впливів.

Перехід між кратеруванням, відколюванням та перфорацією є поступовим і залежить від комбінації двох безрозмірних параметрів –  $\xi$  та  $\tilde{R}$ .

Графічне подання залежності  $L/a = f(\xi)$  утворює **карту режимів руйнування**, яка дозволяє за заданими характеристиками заряду і матеріалу оцінити тип пошкодження конструкції. Такі узагальнення є основою для побудови подальших робочих формул і калібрування моделі.

*Калібрування та робочі формули аналітичної моделі.*

Побудована аналітична модель описує взаємозв'язок між енергією вибуху та міцністю





Рис. 4. Режим перфорації

Джерело: [1]

бетону у безрозмірній формі, що забезпечує можливість масштабування результатів. Для її практичного застосування необхідно виконати калібрування параметрів за експериментальними та чисельними даними. Цей етап дозволяє уточнити коефіцієнти у виразах (6)–(8), забезпечити їхню узгодженість із фактичними спостереженнями та сформулювати робочі формули для інженерних розрахунків.

Калібрування моделі здійснюється шляхом мінімізації різниці між розрахунковими та експериментальними значеннями глибини руйнування. Для цього застосовується безрозмірна функція похибки (9):

$$\varepsilon = \frac{|L_{\text{експ}} - L_{\text{розн}}|}{L_{\text{експ}}} \times 100\%, \quad (9)$$

де:  $L_{\text{експ}}$  – експериментальна глибина руйнування, м;

$L_{\text{розн}}$  – розрахункове значення за моделлю;

$\varepsilon$  – відносна похибка моделі, %.

Залежно від режиму руйнування (кратерування, відколювання або перфорація) коефіцієнти  $k_i$  та показники степеня  $\beta_i$  підбираються так, щоб середнє значення  $\varepsilon$  не перевищувало 15–20 %.

Для цього виконується серія розрахунків для різних мас заряду та товщин зразків бетону.

У результаті узагальнення експериментальних і чисельних даних встановлено такі усереднені значення параметрів таблиця 1.

Ці значення забезпечують узгодження аналітичних результатів із даними лабораторних випробувань бетонних плит товщиною 0.3–0.6 м при підривах зарядів тротилового еквівалента масою від 0.5 до 2.0 кг.

З урахуванням каліброваних коефіцієнтів робочі вирази набувають вигляду (10):

$$L_{\text{кр}} = 0.9a\tilde{R}, \quad L_{\text{від}} = 2.3a\tilde{R}^{1.25}, \quad L_{\text{перф}} = 2.7a\tilde{R}^{1.5} \quad (10)$$

Відхилення, які спостерігаються при великих зарядах або складних умовах взаємодії, пояснюються: можливим неповним контактом заряду із поверхнею, частковою декомпозицією вибухової речовини, розкидом міцнісних властивостей бетону.

Ці чинники впливають на фактичний обсяг енергії, що передається конструкції, і можуть спричиняти відхилення у межах 10–20 %, що є прийнятним для інженерних оцінок. Калібровані коефіцієнти  $k_i$  та показники степеня  $\beta_i$  з таблиці 1 частково враховують ці ефекти та забезпечують зження середньої похибки моделі.

#### Перевірка моделі та аналіз похибок.

Перевірка аналітичної моделі є ключовим етапом, що дозволяє оцінити її адекватність реаль-

Таблиця 1

#### Калібрувальні коефіцієнти для різних режимів руйнування

| Режим руйнування | $k_i$ | $\beta_i$ | Середня похибка, % |
|------------------|-------|-----------|--------------------|
| Кратерування     | 0.9   | 1.00      | $\leq 10$          |
| Відколювання     | 2.3   | 1.25      | $\leq 15$          |
| Перфорація       | 2.7   | 1.50      | $\leq 20$          |



ним умовам та визначити область застосування. Для цього результати розрахунків порівнювалися з експериментальними та чисельними даними, опублікованими у відкритих дослідженнях, що охоплювали різні маси заряду, характеристики бетону та режими руйнування. Аналіз виконували за безрозмірними залежностями (1)–(8) та робочими формулами (10), використовуючи калібровані коефіцієнти  $k_i$  і  $\beta_i$ , отримані у попередніх розрахунках.

Для перевірки були використані експериментальні результати вибухових випробувань, у яких досліджувались: бетонні плити різної товщини (0.30–0.60 м), заряди тротилового еквівалента масою 0.5–2.0 кг, режими кратерування, відколювання та перфорації, різні відстані та умови контакту заряду.

Для кожного випробування визначали величину: фактичної глибини пошкодження  $L_{\text{експ}}$ , розрахункової глибини  $L_{\text{розн}}$  із застосуванням формул (10), відносної похибки моделі  $\varepsilon$ , визначеної за виразом (9).

Порівняння проводилось окремо для кожного з трьох режимів руйнування. Нижче наведено уза-

гальнений фрагмент результатів у характерному діапазоні параметрів (таблиця 2 та рисунок 5).

Середні значення похибок для кожного режиму:

- **кратерування:** 5–10 %; **відколювання:** 10–15 %; **перфорація:** 8–12 %.

Отримані значення добре узгоджуються з висновками калібрування таблиці 1, де середні похибки не перевищували 20 %.

*Результати дослідження. Характерні діапазони параметрів аналітичної моделі.*

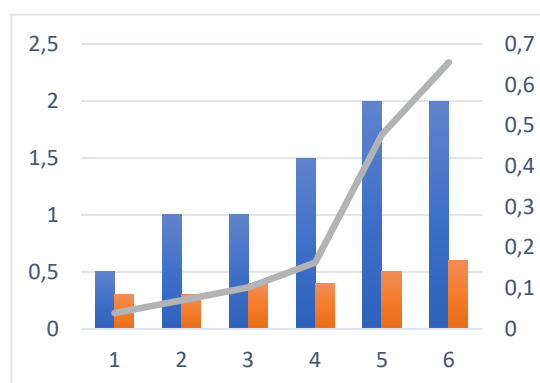
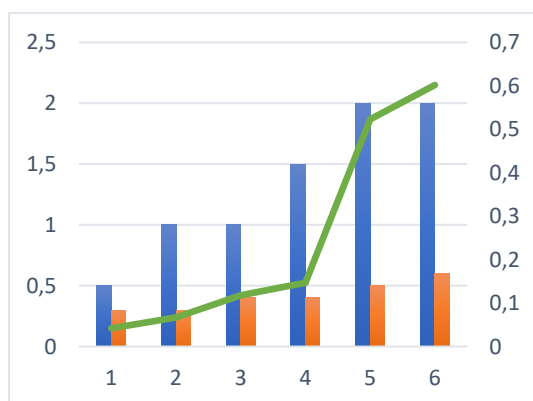
Для проведення розрахунків і подальшого узагальнення результатів було сформовано масив експериментально-чисельних даних, який охоплює основні діапазони параметрів, характерних для бетонних конструкцій цивільного та спеціального призначення. На цій основі визначено робочі інтервали змінних, у межах яких аналітична модель забезпечує стабільні результати та коректно відтворює три режими руйнування. У таблиці 3 наведено основні діапазони параметрів, що склали основу масиву даних для подальшого аналізу.

Узагальнені діапазони визначають межі застосовності подальших розрахункових результатів

Таблиця 2

Порівняння експериментальних та розрахункових результатів

| № з/с | Режим        | Маса заряду, кг | Товщина плити, м | $L_{\text{експ}}$ , м | $L_{\text{розн}}$ , м | Похибка, % |
|-------|--------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| 1     | Кратерування | 0,5             | 0,30             | 0,042                 | 0,039                 | 7,1        |
| 2     | Кратерування | 1,0             | 0,30             | 0,067                 | 0,070                 | 4,5        |
| 3     | Відколювання | 1,0             | 0,40             | 0,118                 | 0,102                 | 13,6       |
| 4     | Відколювання | 1,5             | 0,40             | 0,147                 | 0,163                 | 10,9       |
| 5     | Перфорація   | 2,0             | 0,50             | 0,523                 | 0,478                 | 8,6        |
| 6     | Перфорація   | 2,0             | 0,60             | 0,602                 | 0,655                 | 8,8        |

Рис. 5. Діаграма значень  $L_{\text{експ}}$  та  $L_{\text{розн}}$ 

де кольори відповідають: "синій" – маса заряду, кг; "помаранчевий" – товщина плити, м; "зелений" –  $L_{\text{експ}}$ ; "сірий" –  $L_{\text{розн}}$ .

Джерело: власне дослідження авторів

Таблиця 3

## Узагальнені діапазони параметрів, використаних у моделюванні

| Параметр                               | Діапазон                               | Коментар                                                                                |
|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Маса заряду (у перерахунку на TNT), кг | 0.5 – 2.0                              | Характерні значення для локальних вибухових навантажень малих і середніх інтенсивностей |
| Товщина бетонних плит, м               | 0.30 – 0.60                            | Найбільш поширені значення для елементів захисних конструкцій                           |
| Клас бетону                            | C20/25 – C40/50                        | Діапазон із різною міцністю на розтяг та модулем тріщиноутворення                       |
| Міцність на розтяг, МПа                | 2.0 – 3.8                              | Уточнені значення відповідно до експериментальних даних                                 |
| Умови контакту заряду                  | Повний/частковий                       | Визначає ступінь ефективності навантаження                                              |
| Режими руйнування                      | Кратерування, відколювання, перфорація | Зафіксовано для всіх конфігурацій                                                       |

Таблиця 4

## Результати розрахунків для режиму кратерування

| Маса заряду, кг | Товщина плити, м | Клас бетону | Глибина пошкодження, м |
|-----------------|------------------|-------------|------------------------|
| 0,5             | 0,30             | C20/25      | 0,039                  |
| 1,0             | 0,30             | C25/30      | 0,070                  |
| 1,0             | 0,40             | C30/35      | 0,055                  |
| 1,5             | 0,40             | C25/30      | 0,083                  |

Таблиця 5

## Результати розрахунків для режиму відколювання

| Маса заряду, кг | Товщина плити, м | Клас бетону | Глибина пошкодження, м |
|-----------------|------------------|-------------|------------------------|
| 1,0             | 0,40             | C25/30      | 0,102                  |
| 1,5             | 0,40             | C30/35      | 0,163                  |
| 1,5             | 0,50             | C20/25      | 0,138                  |
| 2,0             | 0,50             | C25/30      | 0,177                  |

Таблиця 6

## Результати розрахунків для режиму перфорації

| Маса заряду, кг | Товщина плити, м | Клас бетону | Глибина пошкодження, м |
|-----------------|------------------|-------------|------------------------|
| 1,5             | 0,50             | C30/35      | 0,401                  |
| 2,0             | 0,50             | C25/30      | 0,478                  |
| 2,0             | 0,60             | C20/25      | 0,655                  |
| 2,0             | 0,60             | C30/35      | 0,602                  |

і дозволяють забезпечити їх коректне порівняння між різними сценаріями навантаження. Надалі ці дані були використані як основа для отримання узагальнених результатів роботи моделі.

**Узагальнені результати розрахунків.**

Розрахунки показали наявність стабільної кореляції між величиною пошкодження та основними параметрами вибухового впливу, що дозволило побудувати узагальнені таблиці для кожного режиму руйнування. У таблицях 4–6 наведено характерні значення глибини пошкодження для основних конфігурацій випробувань.

**Висновки.** У рамках дослідження було розроблено аналітичну модель для прогнозування режимів руйнування бетонних елементів під дією вибухового

навантаження. Модель охоплює три основні режими руйнування – кратерування, відколювання та перфорацію – і дозволяє оцінювати глибину пошкодження залежно від маси заряду, товщини конструкції та фізико-механічних характеристик бетону.

Проведений аналіз сучасних підходів продемонстрував доцільність використання нормованих залежностей та спрощених інженерних співвідношень, що забезпечують можливість відтворення основних закономірностей руйнування без застосування повномасштабного чисельного моделювання. Побудовані на їх основі формули та узагальнені коефіцієнти стали основою для формування інженерного алгоритму, придатного для практичного використання.

Результати моделювання показали, що отримані залежності коректно відображають вплив маси заряду, міцності бетону та товщини конструкції на характер руйнування. Зіставлення розрахункових і експериментально-чисельних даних підтвердило достатню точність моделі у межах робочих діапазонів параметрів. Середні похибки для режимів кратерування та перфорації залишаються на низькому рівні, тоді як у режимі відколювання спостерігається підвищена чутливість до варіацій матеріальних та контактних умов, що є типовим для цього типу руйнування.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого аналітичного підходу та створюють основу для подальшого розвитку моделі. Подальше розширення може передбачати врахування інших типів боєприпасів, армованих або багатошарових конструкцій, а також уточнення залежностей у зонах граничних значень параметрів. У межах сформованої методики модель може використовуватися як інструмент для інженерних оцінок і порівняльного аналізу вибухового впливу на бетонні конструкції.

### Список літератури:

1. Yue S., Qiu Y., Zhang N., & Wang M. Analytical study of local damage on concrete slab subjected to a contact explosion. *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 914–924. DOI <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17074>
2. Li X., Yuan L., Zhang Z., & Chen H. Numerical investigations of reinforced concrete slabs subjected to contact explosions. *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 7. Art. 1063. DOI <https://doi.org/10.3390/buildings15071063>
3. Cai R., Li Y., Zhang C., Cao H., Qi H., & Mao J. Size effect on reinforced concrete slabs under direct contact explosion. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 252. Art. 113656. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113656>
4. Yang D., Zhang B., & Liu G. Experimental study on spall resistance of steel-fiber reinforced concrete slab subjected to explosion. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2021. Vol. 15. Art. 23. DOI <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00459-8>
5. Wang W., Yang J., Wang J., Gao W., & Wang X. Experimental research on anti-contact explosion of POZD coated square reinforced concrete slab. *Explosion and Shock Waves*. 2020. Vol. 40, No. 12. Art. 121402. DOI <https://doi.org/10.11883/bzycj-2020-0180>
6. Li J., Wu C., Hao H., Wang Z., & Su Y. Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions. *International Journal of Impact Engineering*. 2016. Vol. 93. P. 62–75. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.02.007>
7. Wang Z., Chen W., Huang Z., & Hao H. Numerical study on perforation damage and fragmentation of reinforced concrete slab under close-in explosion. *Engineering Failure Analysis*. 2024. Art. 107985. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.107985>
8. Yang C., Yan J., Liu Y., Lü Z., & Huang F. Damage characteristics of corrugated steel concrete slab under contact explosion load. *Transactions of Beijing Institute of Technology*. 2022. Vol. 42, No. 5. P. 453–462. DOI <https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2021.108>
9. Zhao C., Wang Q., Wang J., & Zhang Z. Blast resistance of containment dome reinforced concrete slab in NPP under close-in explosion. *Chinese Journal of High Pressure Physics*. 2019. Vol. 33, No. 2. Art. 025101. DOI <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180598>
10. Kušter Marić M., Ivanović A., Fusić M., Srbić M., & Vlašić A. Experimental investigation of the explosion effects on reinforced concrete slabs with fibers. *Buildings*. 2024. Vol. 14, No. 4. Art. 1080. DOI <https://doi.org/10.3390/buildings14041080>
11. Yamaguchi M., Murakami K., Takeda K., & Mitsui Y. Blast resistance of double-layered reinforced concrete slabs composed of precast thin plates. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2011. Vol. 9, No. 2. P. 177–191. DOI <https://doi.org/10.3151/jact.9.177>
12. Li J., & Hao H. Numerical and theoretical study of concrete spall damage under blast loads. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 553. P. 774–779. DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.553.774>
13. Zhang X., Li Q., Wu C., & Hao H. Dynamic response test of reinforced concrete slab under blast loading. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 507. P. 291–294. DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.507.291>
14. Wang Z., Wu C., Liu K., Su Y., & Li J. Investigation of ultra high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 102. P. 395–408. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.032>
15. Liu Y., Zhang X., Wang Z., Chen G., & Wu C. Experimental and numerical investigation of polyurea reinforced concrete thick slab under contact explosion. *Engineering Failure Analysis*. 2025. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109349>

**Husiev R.O., Malikov S.D. PREDICTION OF DAMAGE IN CONCRETE PROTECTIVE STRUCTURES UNDER EXPLOSIVE LOADING BASED ON DIMENSIONLESS PARAMETERS**

*The article presents an analytical approach for assessing local damage in concrete structures subjected to explosive loading, oriented toward engineering applications and rapid predictive evaluation of the resistance of protective elements. The relevance of the study is driven by the increasing requirements for blast resistance of special-purpose structures, as well as by the limited feasibility of full-scale experiments and computationally intensive numerical simulations at early design stages. The study summarizes recent experimental and numerical–analytical results on contact explosions in concrete slabs and demonstrates that existing approaches often have a restricted range of applicability or require different criteria for individual damage modes. A generalized analytical model based on dimensionless parameters is proposed, accounting for the explosive charge mass, concrete slab thickness, and concrete strength. The model enables the unified prediction of damage depth and identification of the local damage mode—cratering, rear-face spalling, or perforation—without resorting to numerical methods. The analytical relationships are formulated in a form suitable for result scaling and comparison of data obtained from different experimental series. The validity of the proposed approach is verified by comparing the calculated damage depths with published experimental results, demonstrating satisfactory agreement over a wide range of parameters. The practical applicability of the methodology is illustrated through an engineering calculation of a concrete slab for a given charge mass and concrete strength class, with the damage mode determined by comparing the predicted damage depth with the slab thickness. The obtained results provide a basis for using the proposed model as a tool for rapid assessment of blast resistance of concrete elements and for determining the minimum structural thickness required to maintain functional integrity after explosive loading. Further research is recommended to extend the approach to reinforced concrete structures, other types of explosive effects, and to refine the criteria for transitions between damage modes based on an expanded experimental database.*

**Keywords:** local damage, contact explosion, concrete strength, analytical modeling, damage modes, protective structures.

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

УДК 332.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/53>**Пілічева М.О.**<https://orcid.org/0000-0003-1733-7534>

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ В ЗЕМЛЕУСТРОЇ: СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

У статті розглядаються актуальні питання управління проєктами у сфері землепорядної діяльності. Сучасні землепорядні проєкти відзначаються складністю, багатоступеневістю процесів і участю численних зацікавлених сторін. У зв'язку з цим традиційні підходи до управління проєктами потребують інтеграції з гнучкими методологіями та сучасними цифровими платформами. Здійснено огляд методологій Waterfall та Agile, а також розглянуто можливості використання цифрових інструментів Notion, Asana та Trello для організації робіт, контролю виконання завдань та забезпечення ефективної взаємодії між учасниками. Особлива увага приділяється співвідношенню методологій і цифрових платформ із етапами розробки землепорядної документації. Наведено аналіз того, як різні підходи дозволяють оптимізувати управління інформацією, координувати роботу команд і адаптувати процеси до змін у вихідних даних та вимогах замовника. Методологія Waterfall є доцільною для застосування на тих етапах землепорядних проєктів, які характеризуються чітко визначеною послідовністю виконання робіт, регламентованістю процедур та необхідністю суворого дотримання чинних нормативно-правових вимог. Її використання забезпечує логічну структурованість процесів, прозорість контролю та передбачуваність результатів на кожній стадії розробки документації. Водночас методологія Agile ефективно застосовується на етапах, де виникає потреба у високій адаптивності, оперативному реагуванні на зміни та можливості ітеративного уточнення рішень, зокрема під час коригування меж земельних ділянок, уточнення вихідних даних або врахування зауважень зацікавлених сторін. Практичну реалізацію обох підходів забезпечують цифрові інструменти Notion, Asana та Trello, які сприяють централізації даних, координації дій учасників проєкту, контролю виконання завдань і наочній візуалізації процесів управління. Інтегроване поєднання зазначених методологій і цифрових засобів дозволяє підвищити ефективність управління комплексними землепорядними проєктами, забезпечити узгодженість дій між виконавцями, прозорість робіт та належний рівень контролю якості виконання завдань.

**Ключові слова:** управління проєктами, землеустрій, цифрові платформи, планування робіт, процеси управління.

**Постановка проблеми.** В умовах швидких економічних, соціальних та екологічних змін ефективне управління землеустроєм стає одним із ключових факторів забезпечення раціонального використання земельних ресурсів, просторового планування та сталого розвитку територій. Сучасні проєкти у сфері землеустрою відзначаються високою складністю, багатофакторністю та значною кількістю зацікавлених сторін, що обумовлює потребу впровадження прогресивних методів і інструментів управління проєктами.

Традиційні підходи до управління проєктами в землеустрої, які базуються на жорсткому поетапному плануванні робіт, паперовому документообігу, фрагментарному використанні геоінформаційних даних, а також переважно адміністративно-регламентному контролю строків і витрат, не забезпечують належної гнучкості та оперативності прийняття управлінських рішень. Крім того, обмежене застосування автоматизованих систем моніторингу, недостатня інтеграція цифрових інструментів планування та відсут-

ність системного управління ризиками знижують ефективність реалізації землеустрою проєктів та ускладнюють координацію між учасниками проєкту.

Запровадження сучасних методик управління проєктами, зокрема використання цифрових платформ, адаптивних моделей планування, інструментів оцінювання ризиків і контролю виконання робіт, сприяє підвищенню прозорості процесів, ефективності використання ресурсів та якості кінцевих результатів. Таким чином, дослідження сучасних підходів до управління проєктами в землеустрої є актуальним з огляду на необхідність удосконалення організаційно-управлінських механізмів та підвищення результативності землепорядних проєктів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні наукові дослідження засвідчують еволюцію методологій управління проєктами від традиційних лінійних моделей до гнучких та гібридних підходів, орієнтованих на адаптивність і ефективне реагування на зміни. У науковій літературі активно аналізуються можливості застосування Waterfall, Agile, Scrum, Kanban та їх поєднання залежно від умов реалізації проєктів.

Українські дослідники приділяють значну увагу систематизації класичних і гнучких підходів. Зокрема, у роботі [1] розглянуто основні методології управління проєктами (Waterfall, Agile, Scrum, Kanban) та обґрунтовано доцільність використання гібридних моделей для проєктів зі складною структурою і жорсткими часовими та ресурсними обмеженнями. Автори [2] акцентують увагу на методології Agile як ефективному інструменті управління проєктами в динамічному середовищі, підкреслюючи її переваги порівняно з традиційною Waterfall-моделлю. Комплексний огляд сучасних підходів, включно з Agile, Scrum, Kanban, Lean і PRINCE2, представлено у дослідженні [3].

У закордонних публікаціях значну увагу приділено порівняльному аналізу традиційних і гнучких підходів. Зокрема, у роботі [4] запропоновано модель вибору методології залежно від характеристик проєкту, а дослідження [5] доводить доцільність використання гібридних підходів як поєднання адаптивності Agile та структурованості Waterfall. Окремі наукові праці присвячені аналізу конкретних Agile-фреймворків. Так, Scrum розглядається як ефективний інструмент управління складними командними проєктами [6], тоді як Kanban аналізується з позицій оптимізації потоків робіт і управління ресурсами [7].

Додатково в міжнародній літературі підкреслюється ефективність Agile-підходів у проєктах із високим рівнем невизначеності [8].

Проаналізовані наукові публікації свідчать, що сучасні дослідження широко враховують застосування традиційних і гнучких методологій управління проєктами, зокрема Waterfall, Agile, Scrum, Kanban та їх гібридних поєднань, для реалізації проєктів у різних галузях. Водночас у наявних роботах основна увага зосереджена на загальних принципах, перевагах і обмеженнях зазначених підходів без урахування галузевої специфіки землеустрою. Зокрема, недостатньо розкритими залишаються особливості адаптації цих методів до землепорядної діяльності, яка характеризується нормативною регламентованістю, багатостадійністю, просторовою прив'язаністю та участю численних зацікавлених сторін. У зв'язку з цим виникає об'єктивна потреба у проведенні спеціалізованого дослідження, спрямованого на обґрунтування доцільності та визначення особливостей застосування сучасних методів і інструментів управління проєктами у сфері землеустрою.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження особливостей застосування сучасних методів і інструментів управління проєктами у землепорядній діяльності.

**Виклад основного матеріалу.** Ефективне управління проєктами в землепорядній діяльності потребує не лише дотримання нормативно-правових вимог, а й використання сучасних методологій та цифрових інструментів, які дозволяють забезпечити своєчасне виконання завдань, контроль якості та адаптивність до змін. Складність та багатостадійність процесів розробки землепорядної документації, включно з підготовкою технічних завдань, польовими роботами, камеральною обробкою та погодженням результатів, робить доцільним поєднання традиційних і гнучких підходів управління проєктами. У цьому контексті важливо розглянути ключові методології та цифрові інструменти, які можуть підвищити ефективність реалізації землепорядних проєктів.

Waterfall (каскадна методологія) є традиційною методологією управління проєктами, що передбачає чітку послідовність виконання етапів, де кожен наступний крок починається після завершення попереднього. У землепорядній діяльності така структура відповідає усталеним процесам розробки документації, включно з підготовкою вихідних даних, польовими роботами, камеральною обробкою, погодженням та затвердженням результатів. Каскадна модель дозволяє



дотримуватися регламентованих процедур, забезпечує прозорість контролю та відповідність нормативним вимогам. Вона найбільш доцільна для проєктів із чітко визначеними завданнями та мінімальною ймовірністю змін.

Водночас сучасні проєкти землепорядної діяльності все частіше стикаються з невизначеністю та динамічними змінами, що потребує більш гнучкого підходу. Agile (гнучка методологія) орієнтований на ітеративне виконання робіт, активну взаємодію учасників та швидке реагування на зміни. У землепорядній практиці Agile доцільно застосовувати на етапах уточнення меж ділянок, коригування вимог замовника та обробки змінних геодезичних або кадастрових даних. Крім того, гнучкий підхід ефективний у проєктах цифровізації, впровадження геоінформаційних систем та просторового аналізу, де важлива адаптивність рішень у кожній ітерації.

Для реалізації як традиційних, так і гнучких методів управління проєктами у землепорядній діяльності використовуються спеціальні цифрові інструменти:

- Notion дозволяє організувати базу знань, структурувати нормативну базу, технічні завдання, графіки виконання робіт та звіти. Це забезпечує централізоване збереження інформації та зручну комунікацію між учасниками проєкту.

- Asana орієнтована на планування завдань, розподіл відповідальності та контроль строків. У землепорядних проєктах цей інструмент дозволяє координувати роботу між геодезистами, камеральними фахівцями та замовниками, відстежувати залежності між завданнями і своєчасно виявляти ризики затримок.

- Trello реалізує принципи канбан-дошок і забезпечує наочний контроль етапів робіт, таких як підготовка даних, польові роботи, камеральна обробка та погодження документації. Простота використання та візуалізація завдань роблять його ефективним для оперативного управління проєктами та інтеграції з Agile-підходами.

Візуалізація підходів Waterfall і Agile для розробки землепорядної документації представлено на рисунку 1.

Методологія Waterfall (каскадна модель) характеризується послідовним виконанням етапів, де кожний наступний починається після завершення попереднього. На підготовчому етапі здійснюється збір вихідних даних, формування технічного завдання та аналіз нормативної бази. Після цього на етапі камеральної підготовки проводиться аналіз картографічних матеріалів та підготовка проєктних рішень. Польові роботи включають геодезичні вимірювання та уточнення меж ділянок, а на етапі камеральної обробки результатів виконують



Рис. 1. Візуалізація підходів Waterfall і Agile для розробки землепорядної документації



обробку даних і формують графічні та текстові матеріали документації. Наступний етап – погодження – передбачає узгодження документації з органами влади та зацікавленими сторонами, після чого відбувається затвердження та передача результатів, включаючи внесення відомостей до Державного земельного кадастру (ДЗК).

У свою чергу, методологія Agile (гнучка модель) передбачає ітеративне виконання етапів із можливістю паралельної роботи, регулярних уточнень і швидкого реагування на зміни. На підготовчому етапі формують базове технічне завдання, здійснюють первинний збір даних та, за потреби, одночасно починають підготовку проєктних рішень. Камеральна підготовка виконується ітеративно, із регулярним оновленням проєктних матеріалів, а на польових роботах проводять послідовні або частково паралельні вимірювання з внесенням змін у межі ділянок. Етап камеральної обробки результатів передбачає уточнення графічних і текстових матеріалів у кілька ітерацій, а погодження реалізується шляхом поступового внесення зауважень та повторних узгоджень. Нарешті, на етапі затвердження та передачі результатів формується фінальна версія документації після завершення всіх ітерацій.

Для підтримки підходів ефективно застосовуються Trello, Asana та Notion, які забезпечують контроль завдань, візуалізацію процесів та централізацію даних.

Узагальнення особливостей застосування зазначених підходів і інструментів при розробці землепорядної документації представлено в таблиці 1.

За результатами узагальнення (табл. 1) та візуалізації (рис. 1) встановлено, що методологія Waterfall є доцільною на етапах землепорядних проєктів, що характеризуються чіткою послідовністю робіт і суворим дотриманням нормативних вимог. У свою чергу, Agile застосовується на тих стадіях, де необхідна висока адаптивність та швидке реагування на зміни, зокрема при уточненні меж ділянок або коригуванні вихідних даних. Цифрові інструменти Notion, Asana та Trello забезпечують практичну реалізацію обох методологій, сприяючи централізації даних, ефективного контролю виконання завдань та наочності процесів управління. Поєднання зазначених підходів і засобів дозволяє ефективно керувати комплексними землепорядними проєктами, підвищуючи прозорість робіт, рівень координації між учасниками та контроль якості виконання завдань.

Таблиця 1

## Методології та цифрові інструменти управління проєктами у землепорядній діяльності

| Підхід / інструмент | Основна характеристика           | Етапи застосування                                                                  | Приклади застосування                                                                 | Переваги                                                               | Обмеження                                      |
|---------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Waterfall</b>    | Послідовне виконання етапів      | Всі етапи: підготовка, польові роботи, камеральна обробка, погодження, затвердження | Створення технічного завдання, структуроване оформлення документації, контроль якості | Чітка структура, відповідність нормативним вимогам, зручність контролю | Низька гнучкість при змінах                    |
| <b>Agile</b>        | Ітеративність, адаптивність      | Камеральна підготовка, польові роботи, доопрацювання, погодження                    | Адаптація проєктних рішень при змінах меж ділянок, уточнення даних                    | Гнучке реагування на зміни, зменшення ризиків                          | Потребує адаптації до регламентованих процедур |
| <b>Notion</b>       | База знань і планування          | Підготовчий етап, камеральна обробка, затвердження                                  | Структурування нормативної бази, технічного завдання, календарних планів, звітів      | Централізація документації, зручна структура даних                     | Не спеціалізований для контролю строків        |
| <b>Asana</b>        | Управління завданнями і строками | Підготовчий етап, польові роботи, погодження                                        | Координація роботи команд, контроль строків та відповідальних                         | Контроль виконання робіт, відповідальні особи                          | Менш зручна візуалізація процесів              |
| <b>Trello</b>       | Канбан-візуалізація              | Камеральна підготовка, польові роботи, погодження                                   | Візуалізація стану робіт, оперативне управління завданнями                            | Простота, наочність, швидке впровадження                               | Обмежені аналітичні можливості                 |

**Висновки.** У результаті проведеного аналізу встановлено, що традиційна методологія Waterfall є доцільною для реалізації землевпорядних проєктів із чітко визначеними завданнями та стабільними нормативними вимогами. Каскадна модель дозволяє послідовно виконувати всі етапи розробки документації – від підготовки вихідних даних і камеральної обробки до погодження та затвердження результатів – забезпечуючи прозорість контролю та відповідність регламентованим процедурам.

Водночас сучасні проєкти землевпорядної діяльності часто стикаються з високим рівнем невизначеності та динамічними змінами, що потребує застосування гнучких підходів. Методологія Agile орієнтована на ітеративне виконання робіт, активну взаємодію учасників та швидке реагування на зміни, що робить її ефективною на етапах уточнення меж ділянок, коригування вимог замовника та обробки змінних геодезичних або кадастрових даних. Особливо доцільним є використання Agile у проєктах цифровізації,

впровадження геоінформаційних систем та просторового аналізу.

Для практичної реалізації обох підходів застосовуються цифрові інструменти Notion, Asana та Trello, які забезпечують централізацію даних, контроль виконання завдань, наочність і оперативне управління процесами. Notion дозволяє організувати базу знань та структурувати документацію, Asana сприяє плануванню завдань і контролю строків, а Trello забезпечує візуалізацію етапів робіт за принципом канбан-дошок.

Поєднання традиційних і гнучких методологій із сучасними цифровими інструментами дозволяє ефективно керувати комплексними землевпорядними проєктами, підвищуючи прозорість робіт, рівень координації між учасниками та контроль якості виконання завдань. Такий інтегрований підхід є перспективним напрямом для оптимізації процесів у сфері землевпорядкування та забезпечення гнучкості в умовах змінних вимог і динамічного розвитку проєктів.

#### Список літератури:

1. Тарасюк Г. М. Розвиток проєктного менеджменту: основні методології та тренди. *Економіка, управління та адміністрування*. 2023. № 4(106). С. 26–32. DOI: [https://doi.org/10.26642/jen-2023-4\(106\)-26-32](https://doi.org/10.26642/jen-2023-4(106)-26-32)
2. Гавловська Н., Власюк І., Шелепало В. Управління проєктами на основі методології Agile. *Development Service Industry Management*. 2024. Вип. 4. С. 257–261. DOI: [https://doi.org/10.31891/dsim-2024-8\(39\)](https://doi.org/10.31891/dsim-2024-8(39)).
3. Шабардіна Ю., Хоменко О. Особливості сучасних підходів до управління проєктами в розподілених командах в ІТ-сфері. *Науковий вісник Полісся*. 2025. Вип. 1(30). С. 343–356. DOI: [https://doi.org/10.25140/2410-9576-2025-1\(30\)-343-356](https://doi.org/10.25140/2410-9576-2025-1(30)-343-356).
4. Thesing T., Feldmann C., Burchardt M. Agile versus Waterfall Project Management: Decision Model for Selecting the Appropriate Approach to a Project. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 181. Pp. 746–756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.227>.
5. Mishra A., Alzoubi Y.I. Structured software development versus Agile software development: a comparative analysis. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2023. Vol. 14. Pp. 1504–1522. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-023-01958-5>.
6. Hidalgo E.S. Adapting the scrum framework for agile project management in science: case study of a distributed research initiative. *Heliyon*. Vol. 5. Is. 3, e01447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01447>.
7. Lei H., Ganjezadeh F., Jayachandran P.K., Ozcan P. A statistical analysis of the effects of Scrum and Kanban on software development projects. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017. Vol. 43. Pp. 59–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.001>.
8. Balaban S., Duraskovic J. Agile project management as an answer to changing environment. *European Project Management Journal*. 2021. Vol. 11(1). Pp. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.18485/epmj.2021.11.1.2>.

#### **Pilicheva M.O. PROJECT MANAGEMENT IN LAND MANAGEMENT: MODERN METHODS AND TOOLS**

*The article considers current issues of project management in the field of land management. Modern land management projects are characterized by complexity, multi-stage processes and the participation of numerous stakeholders. In this regard, traditional approaches to project management require integration with flexible methodologies and modern digital platforms. A review of the Waterfall and Agile methodologies is carried out, and the possibilities of using digital tools Notion, Asana and Trello for organizing work, controlling task performance and ensuring effective interaction between participants are considered. Special attention is paid to the correlation of methodologies and digital platforms with the stages of land management documentation development. An analysis is presented of how different approaches allow optimizing information management, coordinating the work of teams and adapting processes to changes in source data and customer*

*requirements. The Waterfall methodology is appropriate for use at those stages of land management projects that are characterized by a clearly defined sequence of work, regularity of procedures and the need for strict compliance with current regulatory requirements. Its use ensures logically structured processes, transparent control and predictability of results at each stage of documentation development. At the same time, the Agile methodology is effectively used at stages where there is a need for high adaptability, rapid response to changes and the possibility of iterative refinement of solutions, in particular when adjusting the boundaries of land plots, refining initial data or taking into account the comments of stakeholders. The practical implementation of both approaches is provided by digital tools Notion, Asana and Trello, which contribute to the centralization of data, coordination of actions of project participants, control of task performance and visual visualization of management processes. An integrated combination of these methodologies and digital tools allows to increase the efficiency of management of complex land management projects, ensure consistency of actions between performers, transparency of work and an appropriate level of quality control of task performance.*

**Keywords:** *project management, land management, digital platforms, work planning, management processes.*

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

# ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.383

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/54>**Барило Н.Г.**<https://orcid.org/0000-0002-9101-3768>

Національний університет «Львівська політехніка»

**Брич М.В.**<https://orcid.org/0009-0004-9767-5991>

Національний університет «Львівська політехніка»

**Пришляк С.О.**<https://orcid.org/0009-0001-6514-1141>

Національний університет «Львівська політехніка»

**Брич П.В.**<https://orcid.org/0009-0003-8213-8897>

Національний університет «Львівська політехніка»

**Акопян В.Г.**<https://orcid.org/0009-0002-7130-037X>

Національний університет «Львівська політехніка»

**Марків Д.В.**<https://orcid.org/0009-0006-7744-8825>

Національний університет «Львівська політехніка»

## МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ФОТОСЕНСОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МУЛЬТИПЛІКАТИВНО-ІНТЕГРАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

У статті запропоновано підхід до моделювання спектральних фотосенсорів на основі мультиплікативно-інтегрального перетворення спектральних характеристик. Актуальність дослідження зумовлена зростаючим застосуванням спектральних фотодіодних сенсорів у сучасних оптоелектронних і сенсорних системах, де вирішальне значення мають точність вимірювань, стабільність параметрів та стійкість до змін умов функціонування. Традиційні методи моделювання зазвичай орієнтовані на аналіз локальних спектральних ознак або миттєвих значень сигналів, що обмежує можливості комплексного опису процесу формування інформативного сигналу.

Запропонований підхід базується на розгляді формування інформативного сигналу як результату спектральної взаємодії джерела випромінювання, оптичного середовища та фоточутливого елемента. Мультиплікативно-інтегральна модель дозволяє інтерпретувати інтегральний фотострум як узагальнену інформативну ознаку, що відображає спектральне перекриття основних складових сенсорної системи в заданому діапазоні довжин хвиль.

Для забезпечення практичного аналізу та чисельного моделювання спектральні характеристики окремих елементів подано у параметричній аналітичній формі, що забезпечує узгодженість графічного та математичного представлення спектральних залежностей і спрощує варіаційний аналіз параметрів. Запропонована модель орієнтована на аналіз інтегральних характеристик сигналу, що забезпечує підвищену стійкість до шумів, фонових освітлень та інших дестабілізуючих факторів.

© Барило Н.Г., Брич М.В., Пришляк С.О. та ін., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



*Реалізацію мультиплікативно-інтегральної моделі виконано у SPICE-орієнтованому середовищі шляхом подання спектральних складових у вигляді функціональних блоків з мультиплікативною взаємодією та подальшим інтегруванням результату. Результати моделювання демонструють чутливість інтегрального фотоструму до варіацій спектральних параметрів, зокрема зсуву спектральних максимумів і зміни ширини спектральних смуг, а також до впливу дестабілізуючих факторів, пов'язаних із дрейфом параметрів і деградацією елементів.*

*Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованого підходу як уніфікованого інструменту для аналізу, оптимізації та оцінювання стабільності спектральних фотосенсорів і створюють підґрунтя для подальшого розвитку оптоелектронних сенсорних систем з підвищеними функціональними та діагностичними можливостями.*

**Ключові слова:** спектральний фотосенсор, фотодіодний сенсор, мультиплікативно-інтегральна модель, SPICE-моделювання, оптоелектронні сенсорні системи.

**Постановка проблеми.** Спектральні фотосенсори широко застосовуються в сучасних електронних системах хімічного, біохімічного та медико-біологічного аналізу, а також у вбудованих сенсорних системах моніторингу параметрів середовища. Вони є ключовими елементами кіберфізичних систем, орієнтованих на концепції Інтернету речей, індустріальних і медичних IoT-рішень та «розумних» лабораторій, у яких особливого значення набувають стабільність, відтворюваність і енергоефективність вимірювальних процесів [1–3].

Інформативні сигнали спектральних фотосенсорів формуються внаслідок взаємодії спектральних характеристик джерела випромінювання, досліджуваного оптичного середовища та фоточутливого елемента. У реальних умовах експлуатації ці складові зазнають впливу технологічного розкиду параметрів, температурного дрейфу та часової деградації, що призводить до варіабельності фотоструму та зниження відтворюваності вимірювань [4].

Додаткові ускладнення зумовлені впливом паразитного зовнішнього освітлення та спектральних перекриттів, які формують інтерференційну складову фотоструму і суттєво ускладнюють його селекцію апаратними методами [5].

Вимоги до низького енергоспоживання сучасних вбудованих сенсорних систем обмежують інтенсивність корисного світлового потоку, що призводить до зниження відношення сигнал/завада та підвищує чутливість до зовнішніх дестабілізуючих факторів [6, 7].

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є розроблення моделей спектральних фотосенсорів, які дозволяють формалізувати процес формування фотоструму з урахуванням мультиплікативної взаємодії спектральних складових та інтегрального характеру фотоперетворення, а також оцінювати вплив дестабілізуючих факторів у рамках модельних досліджень.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Сучасні дослідження в галузі спектральних фотосенсорів спрямовані на підвищення селективності, чутливості та стабільності вимірювальних каналів шляхом оптимізації спектральних характеристик світлодіодних джерел випромінювання та фотодіодів. Такі підходи активно застосовуються у вбудованих та IoT-системах, зокрема в інтелектуальних лабораторних і кіберфізичних середовищах [1, 3, 9].

Разом із тим більшість відомих методів базуються на експериментальній калібровці або аналізі окремих елементів сенсорної системи без урахування повного ланцюга формування інформативного сигналу. Зокрема, інтегральний характер фотоструму та вплив спектральних перекриттів часто розглядаються спрощено [8].

Перспективним напрямком є використання математичних моделей, у яких формування інформативного сигналу описується мультиплікативною взаємодією спектральних складових джерела випромінювання, середовища та фотосенсора. Ефективність таких підходів показана в роботах, присвячених мультиплікативним моделям спектрального сигналу [10].

Для схемотехнічного аналізу сенсорних систем широко застосовуються SPICE-орієнтовані підходи, які дозволяють враховувати електричні параметри сигнальних трактів, шумові складові та температурні фактори [11]. Водночас більшість таких моделей не поєднують електричні параметри зі спектральними характеристиками фотосенсорів у єдиному модельному середовищі.

Запропонований у даній роботі підхід розвиває ідеї, викладені в попередніх дослідженнях авторів, та спрямований на поєднання мультиплікативно-інтегрального опису процесу фотоперетворення зі схемотехнічним моделюванням спектральних фотосенсорів [12].

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення та дослідження моделі спектрального

фотосенсора на основі мультиплікативно-інтегрального опису процесу формування фотоструму, яка дозволяє враховувати взаємодію спектральних характеристик джерела випромінювання, оптичного середовища та фоточутливого елемента, а також оцінювати вплив дестабілізуючих факторів у рамках модельних та схемотехнічних досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** Процес формування інформативного сигналу спектрального фотосенсора доцільно розглядати як результат взаємодії спектральних характеристик джерела випромінювання, оптичних властивостей досліджуваного середовища та спектральної чутливості фоточутливого елемента. Кожна з цих складових формує власний спектральний внесок, а результуючий сигнал визначається їх сумарною дією в заданому спектральному діапазоні.

На рис. 1 наведено узагальнену ілюстрацію досліджень у галузі спектральних фотосенсорів, яка відображає концепцію формування інформативного сигналу як результату послідовного спектрального перетворення. Показано спектральні характеристики джерела випромінювання  $A(\lambda)$ , оптичного середовища  $M(\lambda)$  та фотосенсора  $S(\lambda)$ , а також етапи їх аналітичної апроксимації та подальшої мультиплікативної взаємодії з інтегруванням за довжиною хвилі.

У межах такого підходу інформативний сигнал спектрального фотосенсора описується мультиплікативно-інтегральною залежністю:

$$I_{ph} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} A(\lambda) M(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де  $A(\lambda)$  – спектральна характеристика джерела випромінювання,  $M(\lambda)$  – спектральна передавальна функція оптичного середовища,  $S(\lambda)$  – спектральна чутливість фотосенсора,  $\lambda$  – довжина хвилі оптичного випромінювання,  $d\lambda$  – елементарний інтервал спектральної області інтегрування.

Для забезпечення зручності параметричного аналізу та подальшого схемотехнічного моделювання спектральні характеристики джерела випромінювання та фотосенсора доцільно апроксимувати аналітичними функціями. У даній роботі використано апроксимацію у вигляді функцій нормального розподілу, що дозволяє з достатньою точністю описувати реальні спектральні залежності світлодіодів і фотодіодів та водночас зберігати простоту параметризації.

Загальний вигляд апроксимаційної функції описується виразом:

$$G(\lambda) = K \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

де  $\lambda_0$  – визначає положення спектрального максимуму,  $\sigma$  – характеризує ефективну ширину спектральної смуги,  $K$  – коефіцієнт нормування, що відповідає амплітуді спектральної характеристики.

Використання такої апроксимації дозволяє досліджувати вплив зсуву спектральних максимумів, зміни ширини спектральних смуг та варіацій

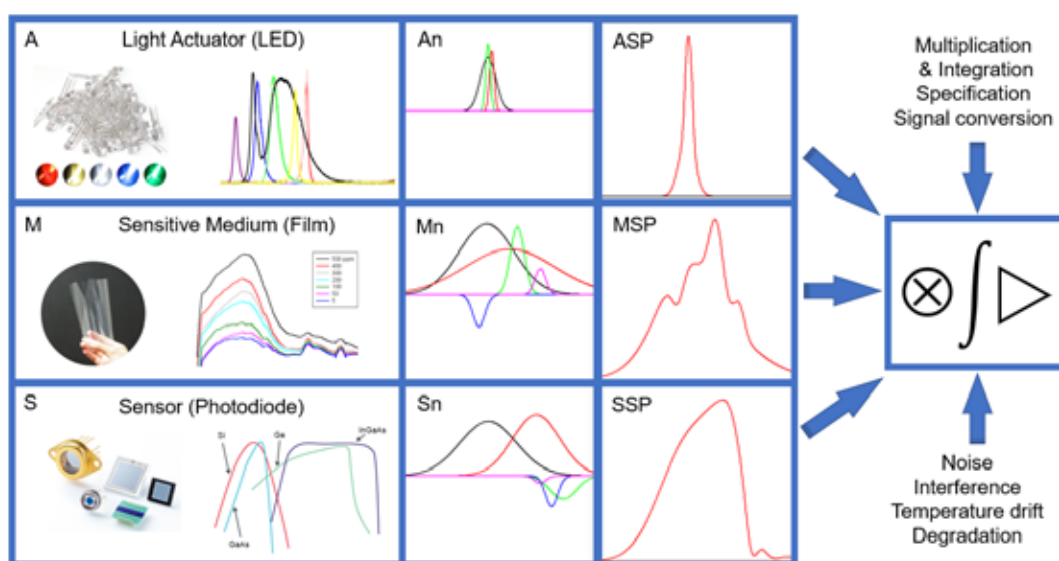


Рис. 1. Ілюстрація досліджень в галузі спектральних фотосенсорів

амплітуди на значення інтегрального фотоструму  $I_{ph}$ . Це є принципово важливим для аналізу температурного дрейфу, технологічного розкиду параметрів і деградації елементів сенсорної системи.

У запропонованій моделі інтегральний фотострум  $I_{ph}$  розглядається не як безпосередній результат фотоперетворення, а як узагальнена інформативна ознака, що відображає спектральну взаємодію джерела випромінювання, оптичного середовища та фоточутливого елемента. На відміну від підходів, орієнтованих на аналіз окремих спектральних максимумів або локальних значень сигналу, інформація в даній моделі закладена в інтегральному результаті спектрального перекриття.

Зміна параметрів будь-якої зі спектральних складових – положення центральної довжини хвилі, ширини спектральної смуги або амплітуди – призводить до характерної зміни інтегрального фотоструму, що може бути використано для ідентифікації стану оптичного середовища, фотосенсора або джерела випромінювання. Формування інформативної ознаки на рівні спектрально-інтегральної оцінки знижує чутливість моделі до випадкових шумових складових і паразитного фонового освітлення, які мають інший спектральний розподіл.

Параметричне подання спектральних характеристик у вигляді аналітичних функцій дозволяє пов'язати зміни параметрів  $\lambda_0$  та  $\sigma$  з фізичними процесами температурного дрейфу, технологічного розкиду та деградації елементів сенсорної системи. Таким чином, інтегральний фотострум  $I_{ph}$  може використовуватися як комплексний показник функціонального стану спектрального фотосенсора.

Запропонована мультиплікативно-інтегральна модель є зручною для реалізації у середовищах схемотехнічного моделювання. Аналітичний опис спектральних характеристик дозволяє представити їх у вигляді функціональних блоків, безпосередньо придатних для використання в SPICE-орієнтованих симуляторах.

На рис. 2 наведено функціональну схему SPICE-моделі спектрального фотосенсора, у якій спектральні складові  $A(\lambda)$ ,  $M(\lambda)$  та  $S(\lambda)$  представлені у вигляді параметричних блоків, а їх мультиплікативна взаємодія реалізується за допомогою керованих джерел сигналів.

Інтегральний характер фотоперетворення в моделі реалізується шляхом накопичення результату мультиплікативної взаємодії спектральних компонент, що дозволяє інтерпретувати інтегральний фотострум як електричну величину, сумісну з подальшим аналізом сигнальних трактів. Відповідний інтегральний сигнал на виході SPICE-макромоделі наведено на рис. 3.

На рис. 4 наведено результати моделювання, які ілюструють зміну інтегрального сигналу при варіації параметрів аналітичної апроксимації спектральних характеристик, зокрема положення спектральних максимумів і ширини спектральних смуг. Отримані результати демонструють чутливість моделі до спектральних зсувів і підтверджують можливість використання інтегрального фотоструму як інформативної ознаки стану сенсорної системи.

На рис. 5 наведено результати моделювання впливу дестабілізуючих факторів, зокрема змін параметрів, що можуть відповідати температурному дрейфу або деградації елементів. Показано, що навіть за незначних варіацій

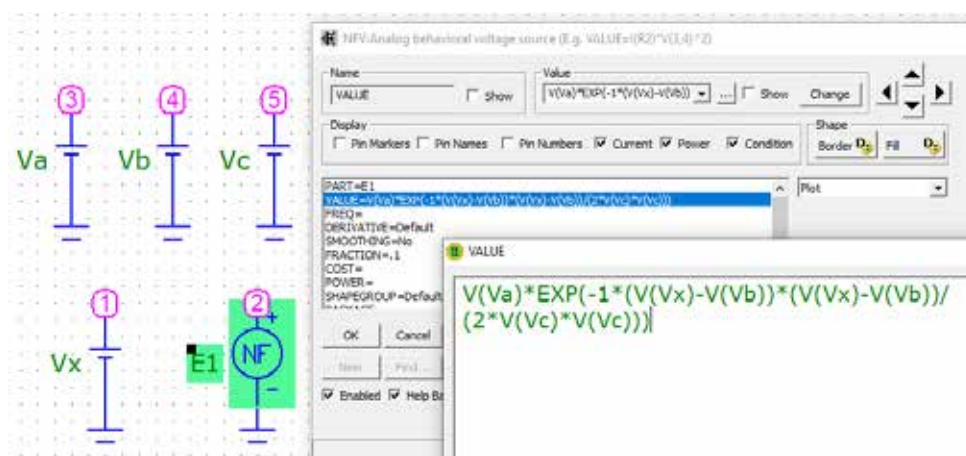


Рис. 2. SPICE-орієнтована функціональна модель спектрального фотосенсора з реалізацією мультиплікативної взаємодії спектральних складових та інтегрування результату



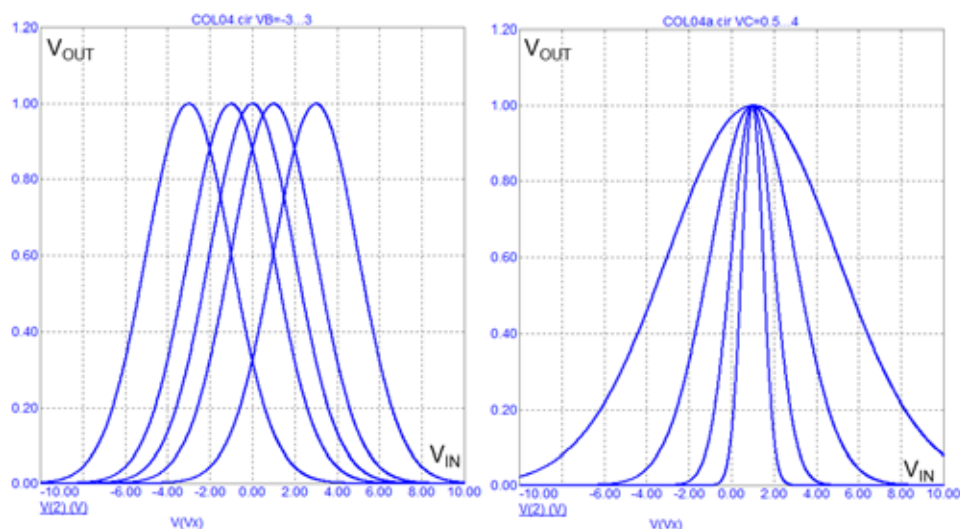


Рис. 3. Вихідний інтегральний сигнал SPICE-макромоделі спектрального фотосенсора

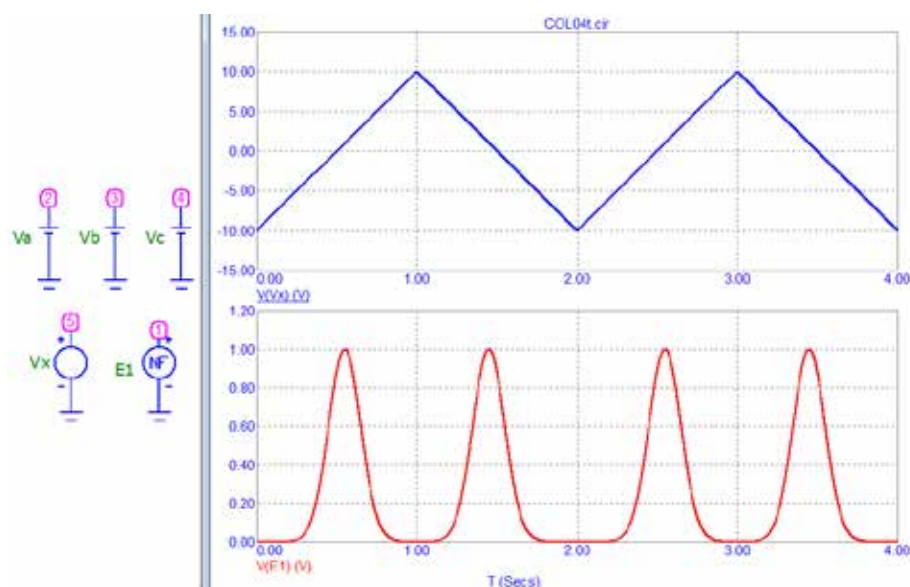


Рис. 4. Зміна інтегрального сигналу спектрального фотосенсора при варіації параметрів спектральних характеристик

спектральних характеристик модель дозволяє виявляти характерні зміни інтегрального фотоструму, що є важливим для задач діагностики та оцінювання стабільності роботи спектральних фотосенсорів.

Таким чином, SPICE-орієнтована реалізація мультиплікативно-інтегральної моделі забезпечує можливість комплексного аналізу спектральних і електронних факторів у межах єдиного модельного середовища та створює передумови для оптимізації параметрів сенсорних систем на етапі проектування.

**Висновки.** У роботі розглянуто підхід до моделювання спектральних фотосенсорів на основі

мультиплікативно-інтегрального поєднання спектральних характеристик джерела випромінювання, оптичного середовища та фоточутливого елемента. Формування інформативного сигналу описано як результат їх спектральної взаємодії в заданому діапазоні довжин хвиль.

Запропонована мультиплікативно-інтегральна модель забезпечує узгоджений математичний опис процесів спектрального фотоперетворення та дозволяє використовувати інтегральний фотострум як інформативну ознаку, чутливу до змін спектральних параметрів сенсорної системи.

Показано можливість параметричної аналітичної апроксимації спектральних характеристик, що

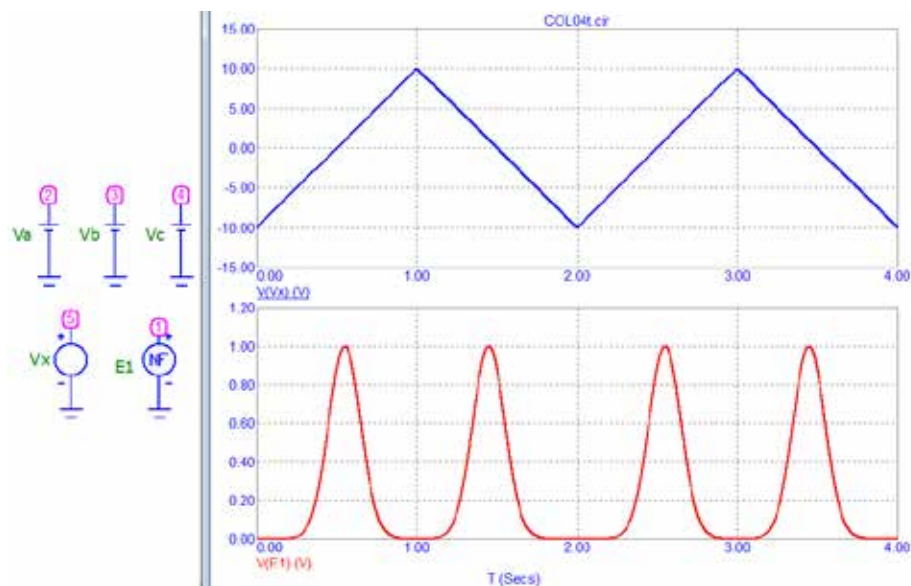


Рис. 4. Зміна інтегрального сигналу спектрального фотосенсора при варіації параметрів спектральних характеристик

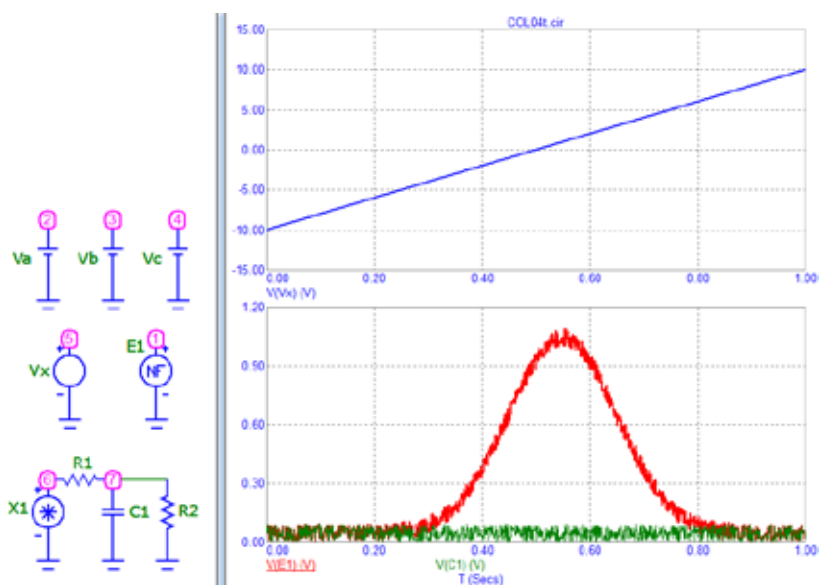


Рис. 5. Вплив дестабілізуючих факторів на формування інтегрального сигналу спектрального фотосенсора

спрощує чисельний аналіз та забезпечує реалізацію моделі у середовищах схемотехнічного моделювання. SPICE-орієнтована реалізація дозволяє враховувати параметричні варіації спектральних складових при аналізі формування інтегрального сигналу.

Результати моделювання підтверджують чутливість інтегрального фотоструму до зсувів спек-

тральних максимумів, змін ширини спектральних смуг, а також до дестабілізуючих факторів, пов'язаних із температурним дрейфом і деградацією елементів фотосенсорної системи.

Запропонований підхід може бути використаний при схемотехнічному моделюванні та аналізі спектральних фотосенсорів оптоелектронного призначення.

## Список літератури:

1. Gounella R., Ferreira G. M., Amorim M. L. M., Soares J. N., Carmo J. P. A review of optical sensors in CMOS. *Electronics*. 2024. Pp. 691. <https://doi.org/10.3390/electronics13040691>
2. Pendão C., Silva I. Optical fiber sensors and sensing networks: overview of the main principles and applications. *Sensors*. 2022. Pp. 7554. <https://doi.org/10.3390/s22197554>
3. Al-Ashwal N. H., Al Soufy K. A. M., Hamza M. E., Swillam M. A. Deep Learning for Optical Sensor Applications: A Review. *Sensors*. 2023. Pp. 6486. <https://doi.org/10.3390/s23146486>
4. Hamamatsu Photonics K.K. Photodiode Technical Information. *Hamamatsu*, 2020. URL: <https://www.hamamatsu.com> (дата звернення: 20.01.2026)
5. He M., Han X., Han J., Guo L., Li C., Han C., Yu H., Gou J., Wu Z., Wang J. Dual-band organic photodetectors with low spectral overlap for dual-channel communications. *Proceedings of SPIE*. 2025. Pp. 1351151. <https://doi.org/10.1117/12.3057129>
6. Mandal S., et al. Low-power optical sensors for embedded and IoT systems. *Microelectronics Journal*. 2021. Pp. 105286. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2021.105286>
7. Reverter F. Direct interface circuits for sensors. *Smart Sensors and MEMS: Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications*. 2014. Pp. 27–62. <https://doi.org/10.1533/9780857099297.1.27>
8. Wei Y., Lehmann T., Silvestri L., Wang H., Ladouceur F. Photodiode working in zero-mode: detecting light power change with DC rejection and AC amplification. *Optics Express*. 2021. Pp. 18915–18931. <https://doi.org/10.1364/OE.426503>
9. Guo D., Lin R., Wang W. Gaussian-optics-based optical modeling and characterization of a Fabry–Perot microcavity for sensing applications. *Journal of the Optical Society of America A*. 2005. Pp. 1577–1588. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.22.001577>
10. Купченко Л. Ф., Карлов В. Д., Риб'як А. С., Гурін О. О., Пономарь А. В. Активна оптико-електронна система виявлення об'єктів з використанням динамічної спектральної обробки оптичного випромінювання. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2021. Т. 24, № 2. С. 218–226. <https://doi.org/10.15407/spqoe24.02.218>
11. Ye Y., Ullrick T., Bogaerts W., Dhaene T., Spina D. SPICE-Compatible Equivalent Circuit Models for Accurate Time-Domain Simulations of Passive Photonic Integrated Circuits. *Journal of Lightwave Technology*. 2022. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3213389>
12. Барило Г. І., Голяка Р. Л., Брич П. В., Павленко М. В., Онутчак Т. А. Моделювання сигнального перетворювача фотодіодних сенсорних пристроїв *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. 2025. Вип. 5, № 1. С. 145–153. <https://doi.org/10.23939/ictee2025.01.145>

# **Barylo N.H., Brych M.V., Pryshliak S.O., Brych P.V., Akopian V.H., Varkiv D.V. MODELING OF SPECTRAL PHOTSENSORS USING MULTIPLICATIVE–INTEGRAL TRANSFORMATIONS**

*This paper presents an approach to modeling spectral photosensors based on a multiplicative–integral transformation of spectral characteristics. The motivation for this study arises from the increasing use of spectral photodetectors in modern optoelectronic and sensor systems, where measurement accuracy, stability, and robustness under varying operating conditions are of critical importance. Traditional modeling techniques often focus on discrete spectral features or local signal values, which limits their ability to comprehensively describe the interaction between optical and electronic components.*

*The proposed approach considers the formation of the informative signal as the result of spectral interaction between the radiation source, the optical medium, and the photosensitive element. A multiplicative–integral model is formulated to describe this interaction, allowing the integral photocurrent to be interpreted as a generalized informative parameter that reflects the spectral overlap of all system components within a given wavelength range.*

*To enable practical analysis and simulation, the spectral characteristics of individual elements are represented in a parametric analytical form. This representation facilitates numerical evaluation of the model and provides a clear link between graphical spectral data and their mathematical description. The model emphasizes the role of integral spectral behavior rather than instantaneous signal values, which improves robustness against noise, background illumination, and other destabilizing factors.*

*A SPICE-oriented implementation of the proposed model is developed to demonstrate its applicability in circuit-level simulation environments. The spectral components are mapped onto functional blocks using controlled sources, while the integral nature of the photocurrent is realized through equivalent electrical integration. Simulation results illustrate the sensitivity of the integral signal to variations in spectral parameters, such as shifts of spectral maxima and changes in bandwidth, as well as to destabilizing effects associated with parameter drift and degradation.*

*The obtained results confirm that the proposed modeling approach provides a unified framework for combining spectral and electronic aspects of photosensor operation. This framework can be effectively used for the analysis, optimization, and stability assessment of spectral photosensors, and it creates a foundation for further development of advanced optoelectronic sensing systems with enhanced reliability and diagnostic capabilities.*

**Keywords:** *spectral photosensor; photodiode sensor; multiplicative–integral model, SPICE simulation, optoelectronic systems.*

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026  
Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026

## Відомості про авторів

**Акопян В.Г.** – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

**Бараннік В.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки

**Баранюк О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Барило Н.Г.** – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

**Беляков Р.О.** – доктор технічних наук, доцент, начальник кафедри радіотехнологій факультету електронних комунікаційних систем Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Біляєва В.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Українського державного університету науки і технологій

**Бойко Ю.М.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій Хмельницького національного університету

**Бошкова І.Л.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

**Бреславець В.С.** – кандидат технічних наук, професор, доцент кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Брич М.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

**Брич П.В.** – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

**Бровін О.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Брунеткін О.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Васильєв Г.С.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Васілова Г.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління комерційною діяльністю залізниць Навчально-наукового Київського інституту залізничного транспорту Національного транспортного університету

**Вербило І. М.** – аспірант кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка»

**Воїнов О.П.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплогазопостачання та вентиляції Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Войцеховська О.О.** – доктор філософії, доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій Вінницького національного технічного університету

**Волгушева Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

**Волобуєва Т.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Воловик А.Ю.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Володимиров В.В.** – аспірант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Українського державного університету науки і технологій

**Волянська Я.Б.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Волянський С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Волянський Ю.С.** – аспірант кафедри автоматики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Воробйова В.І.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Воронець О.М.** – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Гайдар Ю.Б.** – аспірант кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська Політехніка»

**Галицький І.І.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Горецький О.А.** – кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри технологій транспорту та управління процесами перевезень Навчально-наукового Київського інституту залізничного транспорту Національного транспортного університету

**Гредасов Д.О.** – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Гречановський А.П.** – аспірант кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

**Гуляєв В.М.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

**Гусєв Р.О.** – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу проблем РХБ захисту та морської екології, інженерного, радіоелектронного забезпечення і РЕБ науково-дослідного управління розвитку системи оперативного (бойового) забезпечення Військово-Морських Сил науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

**Данилюк І.П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій і готельно-ресторанного сервісу Чернівецького торговельно-економічного інституту Державного торговельно-економічного університету

**Дербеньов Г. С.** – аспірант кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка»

**Дерібо С.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної електрохімії, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Джус А.В.** – аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

**Дорошенко В.В.** – аспірант кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

**Дощенко Г.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії

**Дундуков П.О.** – аспірант кафедри технологій електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Елькін Ю.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри теплогазопостачання та вентиляції Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Єрьоменко О.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики, математики та інформатики Хмельницького національного університету

**Сфімова В.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Живков О.П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Залюбовський М.Г.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну

**Золотарьова О.В.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

**Іванченко Д.А.** – кандидат технічних наук, завідувач кафедри автомобільного транспорту ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Каплуновська А.М.** – старший викладач кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

**Касілов О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Кацарський Ю.С.** – аспірант кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка»

**Кисельов В.Б.** – доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

**Коваленко А.Л.** – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

**Коваленко Ю.І.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Ковач О.І.** – аспірант кафедри технології вина та сенсорного аналізу Одеського національного технологічного університету

**Коробейник С.М.** – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Кошель Г.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри промислового дизайну та комп'ютерних технологій Київської державної академії декоративно-прикладного мистецтва і дизайну імені Михайла Бойчука

**Кошель О.С.** – аспірант кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну

**Кошель С.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну

**Кравченко О.В.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

**Кравчук С.О.** – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кувшинов А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Кузняк В.П.** – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Лещенко С.А.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Літачевський В.В.** – аспірант кафедри управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті Одеського національного морського університету

**Літвяк В.І.** – аспірант кафедри експлуатації флоту і технологія морських перевезень Одеського національного морського університету

**Мазур Є.В.** – аспірант кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка»

**Майдан О.І.** – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Маліков С.Д.** – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу проблем застосування Військово-Морських Сил науково-дослідного управління проблем розвитку, підготовки та застосування



Військово-Морських Сил науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

**Марків Д.В.** – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

**Маслак Г.В.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Мельник Л.І.** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Миронюк І.І.** – аспірант кафедри управління комерційною діяльністю залізниць Навчально-наукового Київського інституту залізничного транспорту Національного транспортного університету

**Мицик А.І.** – аспірант кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Мінаков В.М.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Мініна Ю.О.** – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

**Мітіна Н.Б.** – кандидат технічних наук, завідувач кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

**Мішнев А.С.** – аспірант ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Музика Д.О.** – аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Мукмінов І.І.** – доктор філософії у галузі теплоенергетики, старший викладач кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

**Наговський Д.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії

**Назарова А.П.** – аспірант кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету

**Нестерко А.Б.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ніколенко М.С.** – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Ніконенко А.М.** – викладач кафедри бойового та логістичного забезпечення Київського інституту Національної гвардії України

**Олійник М.В.** – асистент кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Омелич М.Ф.** – провідний інженер кафедри прикладної радіоелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Острогляд О.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

**Павлова Н.Л.** – кандидат технічних наук, доцент, директор навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

**Парій С.Г.** – старший викладач кафедри бойового та логістичного забезпечення Київського інституту Національної гвардії України

**Перетятко Ю.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пилипенко Т.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Писаревський І.О.** – аспірант кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

**Пікенін О.О.** – старший викладач кафедри космічної інженерії Навчально-наукового інституту аерокосмічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пілічева М.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Позняк К.О.** – аспірант кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пономарьов М.Є.** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Приймак С.О.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пришляк С.О.** – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

**Прокопенко Р.О.** – аспірант кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки

**Проценко О.Р.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пустовойтов П.Є.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Пятін І.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент відділення комп'ютерної інженерії Відокремленого структурного підрозділу «Хмельницький політехнічний фаховий коледж Національного університету «Львівська політехніка»»

**Рачинський А.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Савченко М.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Семенець Ю.В.** – магістр кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Семенова О.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

**Сидоренко Ю.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сільванська Г.М.** – кандидат економічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

**Скакун О.В.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Скалозубов В.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка»

**Скиба М.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології Українського державного університету науки і технологій

**Склярєнко Ю.О.** – аспірант ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Сокол Г.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Солдатенков В.Ю.** – аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Степанов О.В.** – доктор технічних наук, професор, кафедра тракторів та автомобілів Національного університету біоресурсів і природокористування України

**Струтинська Л.Т.** – старший викладач кафедри харчових технологій і готельно-ресторанного сервісу Чернівецького торговельно-економічного інституту Державного торговельно-економічного університету

**Судаков Є.В.** – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Сущенко Р.В.** – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

**Тафій В.В.** – здобувач вищої освіти кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

**Троценко Є.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Турпак С.М.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

**Усенко А.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Українського державного університету науки і технологій

**Ущановський Д.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Фомін О.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства Національного транспортного університету

**Форись С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Українського державного університету науки і технологій

**Хара М.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Черненко П.В.** – старший викладач кафедри автомобільної техніки Національної академії Національної гвардії України

**Чмельов В.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехнічних систем, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Чурілов І.О.** – заступник начальника з навчальної роботи Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Шиман М.В.** – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Шокота М.Ю.** – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

**Шпак Н.Г.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті Одеського національного морського університету

**Шпілєвая Т.М.** – старший викладач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, провідний фахівець відділу організації практики, дипломування та працевлаштування Херсонської державної морської академії

**Юрченко Д.О.** – асистент кафедри управління комерційною діяльністю залізниць Навчально-наукового Київського інституту залізничного транспорту Національного транспортного університету

**Яковенко І.В.** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Ященко В.С.** – аспірант кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

## НОТАТКИ

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 37 (76) № 1 2026**

**Частина 1**

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 39,52. Ум. друк. арк. 53,01.

Зам. № 0326/270. Наклад 150 прим.

Дата розміщення онлайн: 08.04.2026. Дата друку: 15.04.2026

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.