

**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 36 (75) № 6 2025

Частина 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

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 № 6 від 29 грудня 2025 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

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2025

ЗМІСТ

ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

Максимов С.В., Максимова О.С., Пристінський С.М.

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЗМІНІ ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ.....1

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Габовда О.В., Одошевський О.С.

ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЗАСОБАМИ ПРОГРАМНОГО
КОМПЛЕКСУ SOLIDWORKS.....10

Ремінь А.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОАКТИВНОСТІ ПРИВОДУ КАБЕЛЬНОГО БАРАБАНАУ ПРИЧАЛЬНОГО
КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЙОГО ЕФЕКТИВНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....17

Селезньов М.С., Боровік П.В.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РОЗДІЛОВОГО ПРОЦЕСУ НА МЕТАЛОЄМНІСТЬ
НОЖИЦЬ З ШЕВРОННИМ НОЖЕМ.....22

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Царенко А.О., Тягній В.Г., Головенський В.В., Кириченко О.П.

ПЛАНЕР І ТРАНСМІСІЯ ЯК КЛЮЧОВІ ЕЛЕМЕНТИ НАДІЙНОСТІ ТА ІНВЕСТИЦІЙНОЇ
ПРИВАБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ ВЕРТОЛІТНИХ СИСТЕМ.....28

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Перетятко Ю.В., Троценко Є.О., Нестерко А.Б., Душенюк П.В., Базан С.Г.

УНІФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ТЕРМІНОЛОГІЇ: ПРОБЛЕМИ, РОЗБІЖНОСТІ
ТА НАПРЯМИ ГАРМОНІЗАЦІЇ СТАНДАРТІВ.....38

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Бараннік В.В., Ревва К.В.

МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ В СИСТЕМАХ СТИСНЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЦІЛІСНОСТІ ВІДЕОДАНИХ.....46

Білевський П.С.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ТИПІВ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ.....51

Воронець О.М., Воронець В.М., Трубочанінова К.А.

МЕТОД АДАПТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В УМОВАХ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ
СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ.....58

Гончаров О.А., Шпилька О.О.

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО КОРЕЛЬОВАНИХ ЗАВАД ДЛЯ FSCM-ПОДІБНОЇ МОДУЛЯЦІЇ.....66

Мацкевич В.В., Паламарчук В.О., Волошин В.О., Мадінов М.Л., Бойко О.В.

НАСКРІЗНА СПІЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ГІБРИДНИХ МЕРЕЖ ІЗ РОЗНЕСЕНИМИ
АНТЕННИМИ СИСТЕМАМИ, АІ-КЕРУВАННЯМ, СУПУТНИКОВИМ РОЗШИРЕННЯМ
ПОКРИТТЯ, ПОЛІПШЕНИМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМИ ЛІНІЯМИ
ТА ТРАФІК-ЧУТЛИВИМ МЕНЕДЖМЕНТОМ РЕСУРСІВ.....74

Михалевський Д.В., Бриль Д.Р.

ОЦІНЮВАННЯ ПОКРИТТЯ КОРПОРАТИВНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ
СТАНДАРТУ WI-FI ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАСОБІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....82

Редько І.В., Тонкоглас Ю.В.

АНАЛІЗ ЛІНІЙНО-ЧАСТОТНО МОДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ
В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....88

Рибак А.В., Карпенко А.О.

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЕМУЛЯЦІЙНІ СЕРЕДОВИЩА GNS3
ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДІАГНОСТИКИ МЕРЕЖ.....95

Сайко В.Г., Наритник Т.М., Радзівілов Г.Д., Комаров В.О., Станілога О.О. ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ У ТЕРАГЕРЦОВИХ РАДІОДАТЧИКАХ НА ОСНОВІ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ.....	103
Теглівець О.В. ВПЛИВ СПОТВОРЕНОЇ КОНТРАСТНОСТІ НА СПРИЙНЯТТЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ: ПОРІВНЯННЯ ОЦІНОК ЕКСПЕРТІВ ТА БАЗИ TID2013.....	110
Тимофєєв Є.М., Лисенко О.І. МЕТОД ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО В ЗАДАЧІ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ З МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	116

ЕНЕРГЕТИКА

Малогулко Ю.В., Тептя В.В., Остра Н.В., Сікорська О.В., Затхей К.О. КЛЮЧОВА РОЛЬ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У ПІСЛЯВОЄННІЙ ВІДБУДОВІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ.....	124
Рачинський А.Ю. МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛООВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЕПЛОВІ Й ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ КОТЛА ДКВР-10-13.....	133
Усов І.Л., Шелешей Т.В. ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ: АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ ВИКИДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	141
Форись С.М., Усенко А.Ю., Шемет Т.М. ГЕОТЕРМАЛЬНІ ТЕПЛОВІ НАСОСИ З БАГАТОКОНТУРНИМИ ҐРУНТОВИМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ КАМПУСІВ.....	149

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Валерко Р.А., Пацева І.Г., Герасимчук Л.О., Кириленко Н.П., Бондарчук В.М. ІНТЕГРАЦІЯ ESG-КРИТЕРІЇВ ТА СТАНДАРТІВ ЄС У СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ КАР'ЄРНИМИ ВОДАМИ ГІРНИЧОЇ ГАЛУЗІ: ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ, МОНІТОРИНГ ТА ІНСТРУМЕНТИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ.....	157

МЕТАЛУРГІЯ

Волошин В.С. ВІДХОДИ В ТЕХНОЛОГІЯХ РЕЦИКЛІНГУ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ (НА ПРИКЛАДІ ПЕРЕРОБКИ ДОМЕННИХ ШЛАКІВ).....	162

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Близнюк О.М., Костюк Т.А., Василенко І.В., Воронкін А.А., Волощук В.В., Асєєва І.В., Лебедєв В.В. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ «РОЗУМНИХ» БІОЛОГІЧНО-АКТИВНИХ ГІДРОГЕЛІВ ДЛЯ ЦІЛЬОВОЇ ДОСТАВКИ ЛІКАРСЬКИХ ТА ТЕРАПЕВТИЧНИХ ПРЕПАРАТІВ.....	168
Бровін О.Ю., Коваленко Ю.І., Лещенко С.А., Дерібо С.Г., Чорна Н.А. АНОДНА ПОВЕДІНКА МАГНІЮ І ЙОГО СПЛАВІВ У РОЗЧИНІ ХЛОРИДІВ.....	172
Кузьмінський В.Ю., Варлан К.Є., Суворова Ю.О., Черваков О.В., Черваков Д.О. МОДИФІКАЦІЯ АЛКІДНИХ СМОЛ ЕСТЕРАМИ ПОЛІАСПАРГІНОВИХ КИСЛОТ.....	179
Лещенко С.А., Бровін О.Ю., Дерібо С.Г., Мулявка Д.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОСТАДІЙНОГО ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЧОРНИХ ГІБРИДНИХ КОНВЕРСІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ.....	185
Малиновський В.В., Мігіна Н.Б. ОТРИМАННЯ ПОКРАЩУВАЧА ҐРУНТУ ШЛЯХОМ АЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ КУРЯЧОГО ПОСЛІДУ В ПРОМИСЛОВИХ МАСШТАБАХ	191
Румянцева М.О., Мисов О.П. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ КРЕМНЕЗЕМУ СІРЧАНОКИСЛОТНИМ СПОСОБОМ (ЧАСТИНА І).....	198

Скиба М.І., Воробйова В.І., Скиба Ю.М. МОДИФІКУВАННЯ ЦИСТЕАМІНОМ НАНОДИСПЕРСІЙ ЗОЛОТА І ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ЕКСПРЕС ВИЯВЛЕННЯ ПОЛЮТАНТІВ: СЛІДОВОЇ КІЛЬКОСТІ 2,4,6-ТРИНІТРОТОЛУОЛУ (ТРОТИЛ) У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ.....	203
Стеренчук С.М. ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ФЛАВОНОЇДІВ У РОСЛИННИХ ЕКСТРАКТАХ МЕТОДОМ СПЕКТРОФОТОМЕТРІЇ.....	211
Табачун М.О., Скиданенко М.С. СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ ВІБРАЦІЙНИХ ПРИЛЕРІВ..	217
Шкода В.О., Кравченко О.В., Гуляєв В.М., Коваленко А.Л. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РЕКУПЕРАЦІЇ ПЛАТИНИ З ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАТАЛІЗАТОРІВ ВИРОБНИЦТВА НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ.....	225
Шохін М.В., Гуляєв В.М., Коваленко А.Л. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛАСТОМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ ІЗ МІНЕРАЛЬНИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ.....	231

ТРАНСПОРТ

Волохов О.О. ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ У ПЕРЕВЕЗЕННЯХ РЕФРИЖЕРАТОРНИХ КОНТЕЙНЕРІВ: ВІД RFID ДО БЛОКЧЕЙНУ.....	239
Волянський С.М., Шумило О.М., Мельник О.М., Котенко О.В. МОДЕЛЮВАННЯ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕХНІЧНИХ ВУЗЛАХ МОРСЬКИХ АВТОНОМНИХ ПЛАТФОРМ.....	245
Ienina I.I., Chornogor N.O., Matsui A.M. APPLICATION OF INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEMS AND AI FOR AVIATION EQUIPMENT LIFECYCLE MANAGEMENT.....	252
Захарчук В.Б., Мамрош І.М., Захарчук О.П., Здреник В.С. ОПТИМІЗАЦІЯ ТАКСОМОТОРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У МІСТІ ТЕРНОПІЛЬ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	257
Kyryllova O.V., Kyryllova V.Yu. SMART PORT CLUSTERS AS A MODERN TOOL FOR THE DEVELOPMENT OF THE GLOBAL TRANSPORT COMMUNICATIONS SYSTEM AND A STRATEGIC VECTOR FOR THE POST-WAR RECOVERY OF UKRAINE'S PORT INDUSTRY.....	263
Кисельов В.Б., Лановий О.Т., Кошарний О.М. АНАЛІЗ І БІЗНЕС-ПЛАНУВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ «КИЇВ – ОДЕСА» НА ПЛАТНІЙ ТА БЕЗОПЛАТНІЙ ОСНОВІ.....	270
Лебідь Є.М., Мазуренко О.О., Лебідь І.Г., Лужанська Н.О. ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОБОТИ ТРАНСПОРТНОГО ПІДПРИЄМСТВА ПРИ ПЛАНУВАННІ ЛОГІСТИЧНОГО ЛАНЦЮГА.....	277
Павленко О.І., Баркалова Н.О. ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ МАРШРУТІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ У ВАНТАЖНИХ АВТОПЕРЕВЕЗЕННЯХ.....	285
Петров Л.М., Петрик Ю.М., Борисенко Т.М. ТЕОРІЯ Л.М. ПЕТРОВА З ДОДАТКАМИ Ю.М. ПЕТРИКА ТА Т.М. БОРИСЕНКА ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕОРЕМИ ЗМІНИ КІНЕТИЧНОГО МОМЕНТУ ЗАВАНТАЖЕНОГО КОЛІСНОГО РУШІЯ ВІЙСЬКОВОГО АВТОМОБІЛЯ.....	292
Петров Л.М., Котов Д.О., Марченко В.П., Ярошевський О.М., Скремінський В.К. ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ПІДВИЩЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИМОГ ДО ВІЙСЬКОВИХ АВТОМОБІЛІВ.....	296
Прокудін Г.С., Назарова А.П., Прокудіна І.І. ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ.....	303

Прокудін Г.С., Катрушенко Н.А., Прокудіна І.І., Даніва В.А., Салада А.Т. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОМЕТАНУ НА ВАНТАЖНОМУ ТРАНСПОРТІ УКРАЇНИ.....	309
Селіванова Н.Ю., Шевчук О.С., Березька К.М., Сіран Р.В. АНАЛІЗ УМОВ ВЗАЄМОДІЇ УЧАСНИКІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ.....	315
Селіванова Н.Ю. УПРАВЛІННЯ ІНЦИДЕНТАМИ Й НАДЗВИЧАЙНИМИ СИТУАЦІЯМИ ПРИ АВТОПЕРЕВЕЗЕННЯХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ: РОЛЬ ЕКСПЕДИТОРА ЯК КООРДИНАЦІЙНОЇ ЛАНКИ.....	323
Соколова О.Є., Чередніченко К.В. ОЦІНКА НЕГАТИВНИХ НАСЛІДКІВ ВІЙНИ В УКРАЇНІ ДЛЯ ЄВРОПЕЙСЬКИХ АВІАПЕРЕВІЗНИКІВ.....	331
Фоменко Г.Р. ДОСТУПНІСТЬ МАЛОМОБІЛЬНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ ДО ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНИХ ВУЗЛІВ.....	342
Царенко А.О., Тягній В.Г., Яніцький А.А., Козловська Т.Ф., Олійник Л.Л. РОЛЬ АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ: РИЗИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	347
Чепіль О.О. ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УПРАВЛІННІ, АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЇ ЕТАПІВ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ.....	352
Чорногор Н.О., Єніна І.І., Мацуї А.М. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПАСАЖИРОПОТОКАМИ В АЕРОПОРТАХ.....	356
БУДІВНИЦТВО	
Варивода Ю.Ю., Корчевський Б.Б., Дідок В.Ю. ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УКРАЇНІ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ І ТЕХНОЛОГІЙ.....	362
ГЕОДЕЗІЯ	
Пілічева М.О. ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ МАСОВОЇ ОЦІНКИ ЗЕМЕЛЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	371
ЕЛЕКТРОНІКА	
Гребінь О.П., Левенець Н.Ф., Трапезон К.О., Тронь І.В. ПОРІВНЯННЯ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИГНАЛІВ В КОНТЕКСТІ РОБОТИ ЗВУКОРЕЖИСЕРА.....	377
Обухова Т.Ю., Семененко М.О., Барбаш В.А., Мочук П.С. МЕХАНІЗМИ ПЕРЕНОСУ ЗАРЯДУ В СТРУКТУРАХ НАНОЦЕЛЮЛОЗА–МЕЛАНІН.....	385
Охрімчук О.Б., Вербицький В.Г. ЗАСТОСУВАННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	391
Semenenko M.O., Obukhova T.Yu., Koval V.M., Kravchenko S.O., Chopyk V.V., Sarikov A.V. ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES WITH PHTHALOCYANINE LAYERS FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS.....	398
Shtykalo O.V., Yamnenko I.S. ELECTRONIC TRAFFIC MONITORING SYSTEM BASED ON BLUETOOTH TECHNOLOGY.....	405
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	412

CONTENTS

APPLIED GEOMETRY, ENGINEERING GRAPHICS AND ERGONOMICS

Maksymov S.V., Maksymova O.S., Prystynskyi S.M.

ANALYSIS OF TRANSPORT SYSTEM RESILIENCE UNDER CHANGING TRAFFIC INTENSITY.....1

MACHINE SCIENCE

Habovda O.V., Odoshevskyi O.S.

PARAMETRIC MODELING OF A WORM GEAR USING SOLIDWORKS SOFTWARE..... 10

Remin A.V.

RESEARCH OF THE VIBROACTIVITY OF THE CABLE DRUM DRIVE OF A QUAY
CONTAINER CRANE TO ENSURE THE IMPROVEMENT OF ITS EFFICIENT OPERATION.....17

Seleznev M.Ye., Borovik P.V.

ANALYSIS OF SEPARATION PROCESS PARAMETERS INFLUENCE ON THE METAL
CAPACITY OF SHEARS WITH A CHEVRON KNIFE.....22

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Tsarenko A.O., Tiahnii V.G., Golovenskiy V.V., Kyrychenko O.P.

AIRFRAME AND TRANSMISSION AS KEY ELEMENTS OF RELIABILITY AND INVESTMENT
ATTRACTIVENESS IN MODERN HELICOPTER SYSTEMS..... 28

ELECTRICAL ENGINEERING

Peretyatko Yu.V., Trotsenko Ye.O., Nesterko A.B., Dushenok P.V., Bazan S.H.

UNIFICATION OF ELECTROTECHNICAL TERMINOLOGY: PROBLEMS, DISCREPANCIES,
AND DIRECTIONS FOR STANDARDS HARMONIZATION..... 38

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Barannik V.V., Revva K.V.

METHOD OF RESTORATION IN COMPRESSION SYSTEMS TO ENSURE THE INTEGRITY
OF VIDEO DATA.....46

Bilevskyi P.S.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF DIFFERENT TYPES
OF VOLTAGE STABILIZERS.....51

Voronets O.M., Voronets V.M., Trubchaninova K.A.

ADAPTIVE ROUTING METHOD IN CONDITIONS OF VARIABLE SENSOR NETWORK LOAD...58

Honcharov O.A., Shpylka O.O.

IMPROVEMENT OF CORRELATED INTERFERENCE IMMUNITY FOR FSCM-LIKE MODULATION..66

Matskevych V.V., Palamarchuk V.O., Voloshyn V.O., Madinov M.L., Boyko O.V.

END-TO-END JOINT OPTIMIZATION OF HYBRID NETWORKS WITH DISTRIBUTED
ANTENNA SYSTEMS, AI CONTROL, SATELLITE COVERAGE EXTENSION, ENHANCED
FIBER-OPTIC LINES, AND TRAFFIC-AWARE RESOURCE MANAGEMENT.....74

Mykhalevskyi D.V., Bryl D.R.

EVALUATION OF COVERAGE OF CORPORATE WIRELESS WI-FI NETWORKS USING
ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS.....82

Redko I.V., Tonkohlas Yu.V.

ANALYSIS OF LINEAR FREQUENCY MODULATED SIGNALS IN RADAR SYSTEMS..... 88

Rybak A.V., Karpenko A.O.

INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO GNS3 EMULATION ENVIRONMENTS
FOR AUTOMATED NETWORK DIAGNOSTICS.....95

Saiko V.G., Narytnyk T.M., Radzivilov H.D., Komarov V.O., Staniloha O.O.

MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF INTERMEDIATE LINKS IN HYBRID WI-FI
AND MESH NETWORKS BASED ON THE TERAHERTZ BAND CHANNEL.....103

Tehlivets O.V.

THE IMPACT OF DISTORTED CONTRAST ON THE PERCEIVED QUALITY
OF IMAGES: COMPARISON OF EXPERT ASSESSMENTS WITH THE TID2013 DATABASE.....110

Tymofeiev Ye.M., Lysenko O.I.

METHOD FOR APPLYING MIMO TECHNOLOGY TO THE PROBLEM OF INFORMATION
COLLECTION IN MOBILE SENSOR NETWORKS.....116

POWER ENGINEERING

Malohulko Yu.V., Teptya V.V., Ostra N.V., Sikorska O.V., Zatkhei K.O.

THE KEY ROLE OF DISTRIBUTION NETWORKS IN THE POST-WAR RECONSTRUCTION
OF UKRAINE'S ENERGY SYSTEM.....124

Rachynskiy A.Yu.

MODELING OF THE INFLUENCE OF THERMAL LOAD ON THERMAL
AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF THE DKVR-10-13 BOILER.....133

Usov I.L., Sheleshey T.V.

IMPROVING THE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF THERMAL POWER PLANTS:
ANALYSIS OF EMISSION TREATMENT TECHNOLOGIES AND MODERNISATION APPROACHES...141

Forys S.M., Usenko A.Yu., Shemet T.M.

GEOTHERMAL HEAT PUMPS WITH MULTILoop GROUND FIELDS FOR AUTONOMOUS
CAMPUS HEAT SUPPLY.....149

RESOURCE DEVELOPMENT

Valerko R.A., Patseva I.H., Herasymchuk L.O., Kyrylenko N.P., Bondarchuk V.M.

INTEGRATION OF ESG CRITERIA AND EU STANDARDS INTO THE MINE WATER
MANAGEMENT SYSTEM OF THE MINING INDUSTRY: ENVIRONMENTAL RISKS,
MONITORING, AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT TOOLS.....157

METALLURGY

Voloshyn V.S.

WASTE IN METALLURGICAL WASTE RECYCLING TECHNOLOGIES
(ON THE EXAMPLE OF TECHNOLOGIES FOR PROCESSING BLAST FURNACE SLAG).....162

CHEMICAL TECHNOLOGY

Bliznyuk O.M., Kostyuk T.A., Vasylenko I.V., Voronkin A.A., Voloshchuk V.V., Asieieva I.V., Lebedev V.V.

CURRENT STATUS OF DEVELOPMENT OF “SMART” BIOLOGICALLY ACTIVE HYDROGELS
FOR TARGETED DELIVERY OF MEDICINAL AND THERAPEUTIC DRUGS.....168

Brovin O.Yu., Kovalenko Yu.I., Leshchenko S.A., Deribo S.G., Chorna N.A.

ANODIC BEHAVIOR OF MAGNESIUM AND MAGNESIUM ALLOYS IN CHLORIDE SOLUTIONS..172

Kuzminskiy V.Yu., Varlan K.Ye., Suvorova Yu.O., Chervakov O.V., Chervakov D.O.

MODIFICATION OF ALKYD RESINS WITH POLYASPARAGINIC ACID ESTERS.....179

Leshchenko S.A., Brovin O.Yu., Deribo S.G., Muliavka D.O.

STUDY OF THE TWO-STAGE FORMATION PROCESS OF BLACK HYBRID CONVERSION
COATINGS ON STEEL 185

Malynovskiy V.V., Mitina N.B.

OBTAINING SOIL IMPROVER BY AEROBIC COMPOSTING OF CHICKEN MANURE
ON AN INDUSTRIAL SCALE.....191

Rumiantseva M.O., Mysov O.P.

COMPUTER MODELING OF THE SILICA PRECIPITATION PROCESS BY THE SULFURIC
ACID METHOD (PART I).....198

Skyba M.I., Vorobiova V.I., Skyba Yu.M.

MODIFICATION OF GOLD NANODISPERSIONS WITH CYSTEAMINE AND STUDY
OF THE EFFECTIVENESS OF APPLICATION FOR THE RAPID DETECTION OF POLLUTANTS:
TRACE AMOUNTS OF 2,4,6-TRINITROTOLUENE (TNT) IN AQUEOUS SOLUTIONS..... 203

Sterenchuk S.M. DETERMINATION OF FLAVONOID CONTENT IN PLANT EXTRACTS BY SPECTROPHOTOMETRIC METHOD.....	211
Tabachun M.O., Skydanenko M.S. CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF VIBRATION DEVICE CONSTRUCTIONS..	217
Shkoda V.O., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. RESEARCH ON THE REGULARITIES OF PLATINUM RECOVERY FROM SPENT CATALYSTS IN NITRIC ACID PRODUCTION.....	225
Shokhin M.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. STUDYING THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ELASTOMERIC COMPOSITIONS WITH MINERAL FILLERS.....	231

TRANSPORT

Volokhov O.O. USE OF INFORMATION SYSTEMS IN REFRIGERATED CONTAINER TRANSPORTATION: FROM RFID TO BLOCKCHAIN.....	239
Volyanskyy S.M., Shumylo O.M., Melnyk O.M., Kotenko O.V. MODELING DEGRADATION PROCESSES IN TECHNICAL NODES OF MARITIME AUTONOMOUS PLATFORMS.....	245
Ienina I.I., Chornogor N.O., Matsui A.M. APPLICATION OF INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEMS AND AI FOR AVIATION EQUIPMENT LIFECYCLE MANAGEMENT.....	252
Zakharchuk V.B., Mamrosh I.M., Zakharchuk O.P., Zdrenyk V.S. OPTIMIZATION OF TAXI TRANSPORTATION IN THE CITY OF TERNOPIL THROUGH THE INTRODUCTION OF MODERN ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES.....	257
Kyryllova O.V., Kyryllova V.Yu. SMART PORT CLUSTERS AS A MODERN TOOL FOR THE DEVELOPMENT OF THE GLOBAL TRANSPORT COMMUNICATIONS SYSTEM AND A STRATEGIC VECTOR FOR THE POST-WAR RECOVERY OF UKRAINE'S PORT INDUSTRY.....	263
Kiselyov V.B., Lanovyi O.T., Kosharnyi O.M. ANALYSIS AND BUSINESS PLANNING OF THE OPERATION OF THE "KYIV – ODESA" HIGHWAY ON A PAID AND FREE BASIS.....	270
Lebid Ie.M., Mazurenko O.O., Lebid I.H., Luzhanska N.O. APPLICATION OF A SIMULATION MODEL OF A TRANSPORT ENTERPRISE IN LOGISTICS CHAIN PLANNING.....	277
Pavlenko O.I., Barkalova N.O. OPTIMIZATION OF LOGISTICS ROUTES TO REDUCE COSTS IN ROAD FREIGHT TRANSPORTATION.....	285
Petrov L.M., Petryk Yu.M., Borisenko T.M. THEORY OF L.M. PETROV WITH ADDITIONS BY YU.M. PETRYK AND T.M. BORYSENKO USING THE THEOREM OF CHANGE OF KINETIC MOMENTUM OF LOADED WHEEL DRIVE OF A MILITARY VEHICLE.....	292
Petrov L.M., Kotov D.O., Marchenko V.P., Yaroshevskyi O.M., Skreminskyi V.K. RESEARCH ON THE CONDITIONS FOR IMPROVING AND IMPLEMENTING OPERATIONAL REQUIREMENTS FOR MILITARY VEHICLES.....	296
Prokudin G.S., Nazarova A.P., Prokudina I.I. OPTIMIZATION OF LOGISTIC CHAINS OF CARGO DELIVERY IN INTERNATIONAL COMMUNICATION.....	303
Prokudin G.S., Katrushenko N.A., Prokudina I.I., Daniva V.A., Salada A.T. PROSPECTS FOR THE USE OF BIOMETHANE IN FREIGHT TRANSPORT IN UKRAINE.....	309
Selivanova N.Yu., Shevchuk O.S., Berezka K.M., Siran R.V. ANALYSIS OF INTERACTION CONDITIONS AMONG STAKEHOLDERS IN DANGEROUS GOODS TRANSPORTATION.....	315

Selivanova N.Yu.

INCIDENT AND EMERGENCY MANAGEMENT IN THE TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS BY ROAD: THE ROLE OF THE FREIGHT FORWARDER AS A COORDINATING LINK.....323

Sokolova O.Ye., Cherednichenko K.V.

ASSESSMENT OF THE NEGATIVE CONSEQUENCES OF THE WAR IN UKRAINE FOR EUROPEAN AIRLINES.....331

Fomenko H.R.

ACCESSIBILITY OF TRANSPORT AND TRANSFER HUBS FOR PEOPLE WITH REDUCED MOBILITY.....342

Tsarenko A.O., Tiahnii V.G., Yanitskyi A.A., Kozlovska T.F., Oliinyk L.L.

THE ROLE OF AVIATION GROUND EQUIPMENT IN ENSURING FLIGHT SAFETY: RISKS AND PROSPECTS OF MODERNIZATION.....347

Chepil O.O.

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MANAGEMENT, AUTOMATION AND SYSTEMATIZATION OF THE STAGES OF THE TRANSPORT PROCESS.....352

Chornogor N.O., Ienina I.I., Matsui A.M.

INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM MODEL FOR PASSENGER FLOW MANAGEMENT IN AIRPORTS.....356

CONSTRUCTION

Varyvoda Yu.Yu., Korchevskyi B.B., Didok V.Yu.

INNOVATIVE METHODS FOR RESTORING CRITICAL INFRASTRUCTURE IN UKRAINE BASED ON ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES.....362

GEODESY

Pilicheva M.O.

FEATURES OF IMPLEMENTATION OF MASS APPRAISAL OF AGRICULTURAL LAND.....371

ELECTRONICS

Grebin O.P., Levenets N.F., Trapezon K.O., Tron I.V.

COMPARISON OF ELECTROACOUSTIC SIGNAL CONVERTERS IN THE CONTEXT OF SOUND ENGINEERING 377

Obukhova T.Yu., Semenenko M.O., Barbash V.A., Mochuk P.S.

MECHANISMS OF CHARGE TRANSPORT IN NANOCELLULOSE–MELANIN STRUCTURES.....385

Okhrimchuk O.B., Verbytskyi V.H.

APPLICATION OF OPTOELECTRONIC SENSORS BASED ON ORGANIC MATERIALS.....391

Semenenko M.O., Obukhova T.Yu., Koval V.M., Kravchenko S.O., Chopyk V.V., Sarikov A.V.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES WITH PHTHALOCYANINE LAYERS FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS.....398

Shtykalo O.V., Yamnenko I.S.

ELECTRONIC TRAFFIC MONITORING SYSTEM BASED ON BLUETOOTH TECHNOLOGY.....405

INFORMATION ABOUT AUTHORS.....412

ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

УДК 656.01:656.13

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/01>

Максимов С.В.

Криворізький національний університет

Максимова О.С.

Криворізький національний університет

Пристінський С.М.

Криворізький національний університет

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЗМІНІ ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ

Актуальність дослідження зумовлена зростанням інтенсивності транспортних потоків та підвищенням рівня невизначеності функціонування транспортних систем у сучасних урбанізованих середовищах. Під впливом глобальних логістичних трансформацій, динаміки мобільності населення, цифровізації транспортних послуг та, особливо, у контексті безпекових викликів, актуалізується потреба у науковому обґрунтуванні підходів до забезпечення стійкості транспортної інфраструктури. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування підходів до аналізу стійкості транспортної системи за умов зміни інтенсивності руху та формування концептуальної моделі адаптивності й антикрихкості з урахуванням сучасних викликів і тенденцій розвитку транспортних мереж. Методологічну основу дослідження становлять мережевий аналіз, системно-динамічний підхід, теорія фазових переходів у транспортних потоках, критичний і компаративний аналіз наукових джерел, логіко-структурне узагальнення, а також елементи імітаційного моделювання транспортної поведінки. Отримані результати підтверджують, що стійкість транспортної системи визначається її здатністю підтримувати функціональні параметри за умов зовнішніх збурень і підвищеної інтенсивності руху, зберігаючи керованість потоків і мінімізуючи ризик переходу до заторового стану. Виявлено порогові явища, що характеризують критичні точки втрати стабільності, та визначено роль макромоделей і мікромоделей у прогнозуванні динаміки потоків. Сформовано авторську концепцію підсилення стійкості, адаптивності та антикрихкості транспортних систем, що включає мережеве резервування, сценарне планування, цифрове моделювання та інституційне навчання систем управління рухом. Практична значущість результатів полягає у можливості використання запропонованих положень для розроблення стратегій транспортної безпеки, модернізації міських систем управління рухом, підвищення готовності інфраструктури до кризових ситуацій та оптимізації рішень з планування транспортної політики на національному та муніципальному рівнях.

Ключові слова: мобільність населення, транспортні режими, мережевий аналіз, адаптивне управління, цифрові транспортні моделі.

Постановка проблеми. Сучасні транспортні системи функціонують в умовах суттєвого ускладнення мобільнісних процесів, зростання динаміки транспортного попиту та посилення впливу зовнішніх ризиків. Урбанізаційні тенден-

ції, інтенсифікація логістичних потоків, цифрова трансформація економіки та підвищення соціальної мобільності формують нові вимоги до стійкості транспортної інфраструктури, яка повинна забезпечувати безперервність руху, передбачува-

ність роботи та здатність до оперативного відновлення після збурень [1]. Особливої актуальності це питання набуває в умовах військових загроз і нестабільності, що характерні для України, де транспортні мережі виконують критичну роль у забезпеченні обороноздатності, гуманітарної мобільності та життєдіяльності територій.

Класичні підходи до управління транспортними потоками ґрунтуються на оптимізаційних моделях та інженерних рішеннях, що зосереджуються на підтриманні пропускну здатності та мінімізації затримок. Проте сучасні виклики, зокрема наявність порогових режимів, ефектів критичної щільності, фазових переходів та нерівномірності транспортних потоків, засвідчують обмеженість традиційних механізмів реагування [2]. У таких умовах стратегічне значення набуває розроблення адаптивних і антикрихких транспортних систем, здатних не лише витримувати стресові навантаження, а й використовувати їх для перегляду алгоритмів, підвищення ефективності та зміцнення функціональної стійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження демонструють зростання наукової уваги до стійкості транспортних систем, що виявляється у розвитку моделей оцінювання адаптивності та відновлюваності транспортних мереж під впливом дестабілізуючих факторів. У праці К. Мауаг та співавторів обґрунтовано системний підхід до моделювання транспортних потоків, який деталізує механізми пасивної й активної адаптації мережі [1]. J. Wassmer із колегами, використавши гравітаційну модель, показали вплив природних катастроф на доступність критичних служб і підкреслили важливість підтримання мобільності в кризових умовах [2]. Дослідження J. Wang та співавторів на прикладі Пекінського метрополітену дозволило ідентифікувати динамічні вузькі місця та оцінити здатність мережі до відновлення [3]. Н.М.І. Kaas та колеги запропонували даноорієнтовану модель напрямності руху, у якій алгоритми машинного навчання поєднано з мережевими показниками для підвищення резильєнтності дорожніх мереж [4]. R. Mou та R. Kang удосконалили методи виявлення критичних вузлів аеропортових мереж, розробивши модель покращеної центральності для оптимізації стратегій відновлення [5]. M.N. Postorino та G.M.L. Sarnè інтегрували дані землекористування в оцінювання резильєнтності, запропонували концепцію «augmented link» [6]. У роботі R. Amghar та ін. представлено підхід «resilience as a service», що орієнтований на коор-

динацію ресурсів різних операторів у кризових ситуаціях [7]. Огляд A.S. Bergantino зі співавторами систематизував просторові закономірності та обмеження існуючих моделей оцінювання стійкості транспортних мереж [8]. Вагомий внесок належить і українським ученим. А. Кравцов та співавтори розробили критерій оцінки стійкості транспортного потоку, який дає змогу визначати робастний діапазон руху та виявляти проблемні ділянки [9]. В. Войтов із колегами створили математичну модель оцінки ергономічної стійкості транспортних потоків, що враховує багатосмуговість і вплив зовнішніх факторів [10], а в подальшій роботі автори сформулювали підхід до прогнозування заторів у містах на основі коливань інтенсивності та інфраструктурних параметрів [11]. Практичну значущість має дослідження Ю. Євчука та співавторів, які довели, що перенесення зупинок за перехрестя та впровадження виділених смуг підвищує стабільність руху та зменшує затримки в системах координованого регулювання [12].

Узагальнюючи представлені підходи, можна відзначити, що сучасний науковий дискурс трактує транспортну стійкість як інтегровану властивість, що об'єднує здатність системи підтримувати функціонування, адаптуватися до змін та еволюційно нарощувати потенціал розвитку. Така перспектива відповідає запитам складного урбаністичного середовища, де ефективне управління мобільністю стає критичним фактором економічної та соціальної стійкості.

З урахуванням попередніх досліджень стійкості транспортних систем залишається невирішеним питання комплексного узгодження підходів до оцінювання надійності, адаптивності та антикрихкості транспортних мереж у динамічно змінних умовах руху. Незважаючи на значний прогрес у моделюванні транспортних потоків, недостатньо досліджено взаємозв'язок між пороговими режимами руху, поведінковими чинниками та цифровими механізмами управління.

Наше дослідження було спрямоване на теоретичне обґрунтування концепції стійкості транспортної системи в умовах зміни інтенсивності руху та формування авторської моделі адаптивного й антикрихкого підходу до її функціонування. У роботі систематизовано наукові підходи, визначено критичні режими роботи інфраструктури та запропоновано концептуальні положення щодо посилення здатності транспортних мереж не лише відновлюватися, а й підвищувати ефективність після стресових впливів.

Постановка завдання. Метою статті є теоретичне обґрунтування підходів до оцінювання стійкості транспортної системи за умов зміни інтенсивності руху та формування концептуальної моделі розвитку адаптивних і антикрихких транспортних мереж, здатних забезпечувати стабільність функціонування в умовах невизначеності та зростання зовнішніх впливів.

Виклад основного матеріалу. Стійкість транспортної системи у сучасній науковій парадигмі розглядається як здатність забезпечувати безперервність транспортних процесів, зберігати оптимальні параметри функціонування та відновлювати роботу після впливу зовнішніх або внутрішніх дестабілізуючих чинників. У транспортній науці це поняття включає збереження пропускну здатності мережі, підтримання стабільності транспортних потоків і забезпечення передбачуваності руху за умов змін інтенсивності, аварійних ситуацій, інфраструктурних обмежень чи підвищення навантаження [13, р. 619].

Концепт стійкості транспорту має міждисциплінарну природу: він співвідноситься із фізичним розумінням стійкості як здатності системи повертатися в рівноважний стан після збурення; з економічним трактуванням, що пов'язане з підтриманням функціональних параметрів системи та мінімізацією втрат; а також із екологічним підходом, у межах якого стійкість означає збереження функціональної рівноваги системи за умов змін середовища та наявності нерівномірних потоків ресурсів [1]. Таке зіставлення демонструє спільну сутність феномену – здатність продовжувати виконання ключових функцій при дії стресорів – і водночас підкреслює специфіку транспортної системи як складного соціально-технічного утворення.

У структурі теоретичних підходів виділяють кілька типів стійкості транспортної системи. Статична стійкість характеризує здатність мережі підтримувати параметри руху за відсутності істотних коливань інтенсивності, тоді як динамічна стійкість відображає здатність системи адаптуватися до змін транспортного потоку, швидко реагувати на перевантаження та переходити між режимами функціонування без втрати ефективності. Структурна стійкість пов'язана зі здатністю інфраструктури та мережових конфігурацій протистояти руйнуванням, а функціональна – зі збереженням ключових операційних можливостей за умов порушення окремих елементів системи [14]. Додатково виділяють операційну стійкість, яка характеризує щоденну здатність системи пра-

цювати в межах допустимих відхилень, та стратегічну стійкість, що відображає довгострокову життєздатність, адаптивність до трансформацій транспортного попиту й здатність інтегрувати інноваційні рішення [6].

Сучасний науковий дискурс доповнюється концепцією антикрихкості (N. Taleb), яка виходить за межі традиційного розуміння стійкості як простого збереження стану або відновлення параметрів. Антикрихкість передбачає здатність транспортної системи не лише протистояти дестабілізуючим впливам і повертатися до попереднього рівня функціонування, але й покращувати показники внаслідок стресу, тобто трансформуватися під дією навантажень і отримувати позитивний ефект від досвіду роботи в нестабільних умовах [15]. У контексті транспортної інфраструктури це може означати переорієнтацію потоків, впровадження інтелектуальних систем управління рухом, оптимізацію мережі та удосконалення логістичних рішень на основі аналізу кризових ситуацій.

Для транспортної інфраструктури стійкість означає здатність системи переналаштовувати потоки, застосовувати інтелектуальні механізми керування рухом та оптимізувати мережеві рішення на основі аналізу кризових ситуацій. У сучасному підході вона еволюціонує від статичного збереження параметрів до динамічної моделі розвитку, що ґрунтується на адаптації, самоорганізації та використанні накопиченого досвіду в умовах змін середовища. Відтак управління інтенсивністю руху та прогнозування коливань транспортного попиту стають ключовими інструментами стабільності транспортної системи [14].

Інтенсивність руху є базовим параметром, що визначає кількість транспортних засобів, які проходять через елемент мережі за одиницю часу, та служить тригером переходу між режимами – від вільного руху до заторового стану. Підвищення попиту, нерівномірний розподіл потоків чи інфраструктурні обмеження зумовлюють необхідність здатності мережі ефективно поглинати пікові навантаження та підтримувати пропускну здатність, що безпосередньо формує рівень її стійкості [5].

Важливою ознакою стійкості транспортної системи є наявність порогових явищ. Точка насичення позначає рівень інтенсивності руху, за якого пропускну здатність мережі досягає максимуму, після чого подальше збільшення потоку спричиняє різке погіршення швидкісних та часових характеристик [1]. Ефект критичної щільності

засвідчує, що навіть незначний приріст транспортного навантаження на межі стійкості здатен ініціювати дисбаланс та переведення системи у нестабільний режим. Затор у цьому контексті виступає фазою системної нестійкості, коли порушується структура потоків, зникає передбачуваність руху, а мережа втрачає здатність до саморегуляції без зовнішнього втручання [16].

Теоретичне пояснення цих процесів ґрунтується на низці моделей. Теорія черг інтерпретує транспортний потік як систему обслуговування зі змінною інтенсивністю надходження та обробки одиниць потоку, що дозволяє моделювати черги та точки перевантаження [17]. Модель Гріншилдса описує лінійну залежність між швидкістю і щільністю руху, демонструючи перехід від вільного стану до режиму перевантаження. Додатково застосовуються макро- та мікросимуляційні підходи, які відтворюють як агреговану динаміку потоків, так і поведінку окремих транспортних засобів, що дає змогу аналізувати турбулентність руху, взаємодію учасників та формування заторів [18].

З метою систематизації наукових підходів та концепцій впливу інтенсивності на стійкість транспортної системи у табл. 1 узагальнено ключові моделі, що описують порогові режими, фазові переходи та динаміку транспортних потоків у контексті забезпечення стійкості транспортної інфраструктури.

Узагальнюючи представлені підходи, можна зазначити, що інтенсивність руху виступає ключовим регулятором стійкості транспортної системи, визначаючи режим її функціонування, рівень завантаженості та чутливість до зовнішніх і внутрішніх збурень. Нерівномірний розподіл транспортних потоків, концентрація на окремих ділянках мережі та наявність критичних порогів формують багатофазну й адаптивну поведінку транспортної інфраструктури, що характеризується циклічними переходами між стабільними, перехідними та нестійкими режимами. Це, у свою чергу, обумовлює необхідність застосування комплексних підходів до прогнозування поведінки транспортних потоків, використання математичного апарату аналізу й моделювання, а також впровадження інтелектуальних систем управління та антикрихких механізмів реагування на дестабілізуючі впливи [6].

Саме тому оцінювання стійкості транспортної системи потребує системної методології, яка охоплює як технічні та експлуатаційні параметри, так і поведінкові, організаційні й стратегічні чинники [7]. Для теоретичного опису стійкості транспортної системи застосовується низка критеріїв, які відображають її продуктивність, надійність, адаптивність та здатність до відновлення в умовах підвищеного навантаження або кризових ситуацій. Узагальнений перелік таких критеріїв представлено у табл. 2.

Таблиця 1

Теоретичні підходи до аналізу впливу інтенсивності руху на стійкість транспортної системи

Підхід / концепція	Ключова ідея	Породжуване явище / режим	Значення для стійкості
Поняття інтенсивності руху	Кількість ТЗ на одиницю часу на відрізку дороги	Рівні навантаження: низьке, середнє, високе	Визначає статус системи: стабільна / потенційно нестійка / критична
Точка насичення (capacity limit)	Максимальна пропускна здатність мережі	Перехід від стабільного до нестійкого режиму	Ідентифікує граничний стан, після якого система деградує
Критична щільність потоку	Поріг, за яким навіть мала зміна інтенсивності спричиняє збій	Нелінійний стрибок до затору	Важлива для прогнозування фазового переходу
Транспортний затор як фаза нестійкості	Самоорганізований хаос в мережі	Режим «jammed» – втрата керованості	Показник втрати стійкості й необхідності зовнішнього втручання
Теорія черг (queueing theory)	Потік як система обслуговування із чергами	Формування черг, перевантаження вузлів	Дозволяє оцінювати затори, час очікування, стабільність
Модель Гріншилдса	Залежність швидкості від щільності	Лінійний перехід free flow → congestion	Математична оцінка порогів стабільності потоку
Макросимуляційні моделі	Системний аналіз загальної динаміки потоків	Визначення глобальних режимів мережі	Дає змогу проєктувати мережеву стійкість
Мікросимуляційні моделі	Моделювання поведінки окремих ТЗ та водіїв	Турбулентність, хвилі заторів	Виявлення локальних механізмів виникнення нестійкості
Антикрихкість (Taleb)	Система покращується після стресу	Адаптація й оптимізація руху після криз	Новий підхід – не просто витримати вплив, а посилити систему

Джерело: побудовано за [1; 8; 17; 18]

**Теоретичні моделі та концепції аналізу транспортних потоків
у контексті стійкості транспортної системи**

Сутність	Ключові прояви для стійкості	Порогові / критичні явища	Обмеження / зауваги
Модель Гріншилдса			
Описує залежність швидкості та щільності потоку; використовує лінійну логіку змін	Допомагає визначити межу між нормальним рухом і початком перевантаження	Точка насичення, уповільнення потоку	Спрощує дійсність, не враховує різну поведінку водіїв
Теорія черг			
Розглядає рух як процес накопичення та обслуговування транспортних одиниць	Дозволяє прогнозувати утворення черг, пікові затримки, вузькі місця	Поріг навантаження, після якого черги зростають експоненційно	Найбільш ефективна для вузлів, перехресть, пунктів контролю
Хвильова теорія заторів (shockwaves)			
Описує формування й поширення «хвиль уповільнення» у потоці	Дозволяє виявляти механізми виникнення локальної нестійкості	Затори, що формуються «самостійно» навіть без аварій	Потребує детальних даних реального руху
Макромодельовання транспортних потоків			
Аналізує систему на рівні міста/ регіону як цілісну мережу	Пояснює поведінку системи під стресом, глобальні режими	Нелінійні переходи між режимами руху	Недостатньо точне для локальних ділянок
Мікромодельовання (agent-based)			
Аналіз окремих транспортних засобів і водіїв	Виявляє локальні ризики нестійкості, поведінкові ефекти	Різкі зупинки, «ланцюгові реакції» заторів	Високі обчислювальні витрати
Антикрихкість (Taleb)			
Система поліпшує роботу після стресу, а не лише повертається до норми	Формування адаптивних стратегій і цифрового управління	Зростання ефективності після кризових ситуацій	Потребує даних, цифрових технологій, адаптивного управління
Інтелектуальні транспортні системи (ITS)			
Використання сенсорів, камер, AI та адаптивного контролю	Підвищують контроль і здатність реагувати в реальному часі	Автокорекція режимів руху та сигналізації	Залежність від технологій та інфраструктури

Джерело: побудовано за [1; 6; 7; 8; 17; 18]

Таким чином, представлені моделі доповнюють одна одну, забезпечуючи можливість аналізу транспортної системи на різних рівнях – від мікроповедінки окремих учасників руху до макродинаміки мережі. Їх застосування дозволяє визначити критичні режими функціонування інфраструктури, виявляти точки втрати стійкості та формувати стратегічні й оперативні рішення для запобігання заторам і підвищення адаптивності транспортної системи [17]. Водночас теоретичні моделі є лише інструментом, ефективність якого визначається реальними параметрами функціонування транспортного середовища, включно зі структурою мережі, організацією дорожнього руху, технічним станом інфраструктури й поведінковими характеристиками користувачів [1]. Саме тому стійкість транспортної системи розглядається як результат взаємодії технічних, організаційних, поведінкових і зовнішніх чинників, які формують її здатність підтримувати функціонування, адаптуватися та відновлюватися за умов змін інтенсивності руху, непередбачених подій або кризових ситуацій [2].

Стійкість транспортної мережі є багатовимірною характеристикою, що включає еластичність (спроможність протидіяти навантаженням), адаптивність (здатність перебудовуватися відповідно до змін), відновлюваність (час повернення до нормальних режимів) і антикрихкість (отримання «позитивного ефекту» після стресу) [17]. Вона формується під впливом низки чинників, серед яких ключове значення мають конфігурація та щільність мережі, технологічний рівень управління рухом, організаційні механізми регулювання транспортних потоків, поведінкові особливості користувачів транспортної інфраструктури та зовнішні умови, включно з безпековим середовищем. Для систематизації цих чинників доцільно представити їх у табл. 3.

Узагальнюючи наведені чинники, стійкість транспортної системи постає як результат взаємодії інженерних рішень, організаційних механізмів, цифрових технологій та поведінкових особливостей учасників руху. Вона визначається не лише пропускнуою здатністю інфраструктури, а й ефек-

Основні чинники стійкості транспортної системи та їх вплив на її функціонування

Сутність	Прояви для стійкості	Потенційні ризики при порушенні	Практичні механізми підсилення
Структура транспортної мережі			
Топологія, зв'язність, наявність альтернативних маршрутів	Забезпечує можливість перенаправлення потоків	Концентрація заторів, мережевий колапс у вузлах	Децентралізація мережі, розвиток об'їздів, мультимодальність
Інтелектуальні транспортні системи (ITS)			
Системи моніторингу, сенсори, AI-керування світлофорами	Швидка реакція на зміни, стабілізація потоків	Затримки в управлінні, некерованість руху	Адаптивне управління, предиктивна аналітика, IoT-інфраструктура
Організація регулювання потоків			
Світлофори, пріоритети, реверсивні смуги	Зниження заторів, оптимізація часу руху	Затримки, хаотизація транспортних потоків	Гнучкі транспортні алгоритми, Smart-Traffic, Bus Priority
Поведінка водіїв та учасників руху			
Мікроповедінка, дисципліна, реакція на стрес	Стабільність і передбачуваність потоків	Агресивне керування, турбулентність потоку	Навчання, культура керування, інформаційні кампанії
Інфраструктурний стан і містопланування			
Пропускна здатність, якість покриття, вузли, розв'язки	Забезпечення стабільної роботи мережі	Швидке накопичення заторів, аварійність	Своєчасний ремонт, розширення вузлів, інфра-резерви
Зовнішні фактори безпеки (військові дії)			
Вплив загроз, блокування, зміна напрямків руху	Гнучкість у кризових ситуаціях	Блокування маршрутів, логістичні затримки	Планування евакуаційних коридорів, адаптивні карти потоків
Стратегічне та оперативне управління			
Координація, планування, кризовий менеджмент	Узгодженість рішень, швидкість реагування	Дезорганізація, затримки, втрати ресурсів	Центри управління трафіком, мобільні команди реагування

Джерело: побудовано за [6; 8; 14]

тивністю керування потоками, рівнем цифровізації, доступністю інформації та здатністю системи й користувачів адаптуватися до змін. За таких умов комплексне оцінювання стійкості потребує інструментів, здатних відтворювати динаміку транспортних процесів та моделювати реакцію мережі на порушення режимів.

Сучасний аналіз стійкості ґрунтується на кількох групах моделей. Мережеві моделі дозволяють оцінити структурну конфігурацію транспортної системи, ступінь її зв'язності та критичні вузли, визначаючи вразливість мережі до локальних і глобальних збоїв [19]. Моделі системної динаміки забезпечують розуміння впливу часових лагів, зворотних зв'язків та накопичення ефектів, що формують адаптивну реакцію системи на зміни інтенсивності потоків. Імітаційні моделі (VISSIM, SUMO) відтворюють поведінкову та інфраструктурну динаміку руху, дозволяючи аналізувати сценарії аварій, ремонтів, обмежень і відновлення пропускної здатності в умовах, близьких до реальних [19]. Додатково застосовуються фазові підходи, які описують переходи між режимами вільного руху, синхронізації та затору, що дає можливість визначати критичні пороги та прогнозувати нестабільність транспортних потоків.

Поряд із класичними підходами до аналізу транспортних процесів все ширше застосовуються гібридні сценарні моделі, що інтегрують мережеву логіку, імітаційні методи та системну динаміку [20]. Використання таких інструментів забезпечує цілісний погляд на поведінку транспортної системи за умов різних типів навантажень, дозволяючи враховувати вплив цифрових технологій, інтелектуальних систем регулювання та алгоритмів адаптивного керування. Відповідно, сучасне трактування стійкості виходить за рамки традиційної функціональної інерційності, фокусуючись на проактивному оновленні, накопиченні знань та використанні кризових ситуацій для структурного і технологічного зміцнення транспортної мережі [20].

Сучасні дослідження засвідчують, що здатність транспортної системи підтримувати функціональні параметри за умов стресу є лише базовим рівнем. У середовищі високої невизначеності, зростання мобільнісних потреб, загроз безпеці та змін поведінкових патернів користувачів ключовою властивістю стає адаптивність – здатність оперативно змінювати конфігурацію руху, маршрути, пріоритети, а також залучати резервні рішення та цифрові сервіси для стабілізації

роботи. Концепція антикрихкості, у свою чергу, означає формування транспортної системи, що не лише витримує вплив зовнішніх шоків, але й здобуває стратегічну перевагу, використовуючи отриманий досвід для підвищення ефективності та стійкості у майбутньому.

У контексті українських реалій це завдання набуває особливої ваги. Функціонування транспортної інфраструктури в умовах військових загроз, динаміки евакуаційних потоків, змінних логістичних маршрутів та тимчасових обмежень вимагає від транспортної системи не лише здатності до швидкого відновлення, але й до підвищення рівня організованості та інтелектуалізації управління.

Саме тому формування адаптивної та антикрихкої транспортної мережі слід розглядати як ключовий стратегічний напрям, що визначає стійкість міських і національних логістичних систем, мобілізаційний потенціал і спроможність держави протидіяти довготривалим викликам – табл. 4.

Запропонована систематизація засвідчує, що формування адаптивної та антикрихкої транспортної системи неможливе лише через інфраструктурну модернізацію. Необхідним є комплексний підхід, що охоплює цифровізацію управління потоками, розвиток прогнозних та інформаційних сервісів, створення мережевих резервів і інституційних механізмів накопичення управлінського досвіду. За таких умов транспортна система розглядається не як суто технічний об'єкт, а як динамічна соціо-кіберфізична екосистема, здатна до самонавчання та проактивної адаптації. В українському контексті цей підхід набуває особливої ваги, оскільки стійкість транспортної інфраструктури безпосередньо пов'язана з безпекою, мобільністю, функціонуванням критичних об'єктів

і підтриманням життєдіяльності територій в умовах тривалих загроз. Інтеграція принципів адаптивності та антикрихкості дозволяє трактувати транспортну мережу як стратегічний ресурс держави, здатний забезпечувати функціонування суспільства навіть у періоди глибокої невизначеності. Таким чином, отримані результати формують методологічну основу для подальшого дослідження механізмів зміцнення транспортної інфраструктури й розроблення практичних інструментів оцінювання та управління стійкістю у довгостроковій перспективі, що створює основу для узагальнення висновків та визначення стратегічних напрямів розвитку стійких транспортних систем.

Висновки. Проведене дослідження засвідчує, що стійкість транспортної системи за змінної інтенсивності руху є багатофакторним явищем, сформованим на перетині інфраструктурних, організаційних, цифрових та поведінкових чинників. Транспортна мережа розглядається як динамічна соціо-технічна система, здатна не лише реагувати на зовнішні впливи, а й трансформувати механізми функціонування в умовах змін середовища. Встановлено, що ключову роль у втраті стійкості відіграють порогові режими руху – точка насичення, критична щільність та фазові переходи від вільного потоку до затору. Ігнорування цих явищ призводить до системної нестабільності, різкого зниження пропускної здатності та погіршення якості транспортного обслуговування. Порівняльний аналіз моделей довів необхідність переходу від статичних підходів до гібридних інструментів, що поєднують мережеве моделювання, системну динаміку, імітаційні алгоритми та цифрові платформи реального часу. Особливу значущість мають інтелектуальні транспортні системи, тех-

Таблиця 4

Концепція підсилення адаптивності та антикрихкості транспортної системи

Компонент	Сутність	Очікуваний ефект	Приклади інструментів
Цифрова проактивність	Використання даних у режимі реального часу та предиктивних моделей	Передбачення кризових режимів, скорочення часу реагування	Big Data-аналітика, AI-прогнозування інтенсивності, цифрові близнюки (digital twins)
Динамічне управління потоками	Гнучка зміна правил організації руху залежно від навантаження	Зменшення ймовірності транспортного колапсу	Адаптивні світлофорні цикли, Smart-routing, децентралізація потоків
Мережеве резервування	Створення альтернативних маршрутів і резервних сполучень	Підвищення стійкості до локальних порушень	Об'їзні шляхи, резервні коридори, мультимодальні вузли
Поведенкова адаптація	Формування гнучких моделей мобільності користувачів	Зниження пікових навантажень, рівномірність потоків	Інформаційні сервіси, попередження, динамічні рекомендації маршрутів
Безпеково-логістична гнучкість	Здатність зберігати функціональність в умовах загроз	Підтримка критичної мобільності та обороноздатності	Евакуаційні маршрути, резервні логістичні схеми, захищені об'єкти управління

Джерело: розроблено автором

нології цифрових двійників і прогностні алгоритми, які забезпечують превентивне управління потоками. Запропонована концепція підсилення адаптивності та антикрихкості передбачає цифровізацію керування рухом, резервування транспортних маршрутів, побудову сценаріїв реагування та інституційне навчання системи на основі даних. Вона орієнтована не лише на відновлення

після стресу, а й на підвищення функціональності транспортної мережі у посткризовий період.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на побудову кількісних індикаторів антикрихкості, розроблення інтегральних методик оцінки стійкості транспортних мереж, а також емпіричну апробацію моделей на прикладі українських міст і міжнародних транспортних осей.

Список літератури:

1. Mayar K., Carmichael D. G., Shen X. Resilience and systems – A traffic flow case example. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*. 2024. Vol. 5. Article 4. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43065-024-00097-w>
2. Wassmer J., Merz B., Marwan N. Resilience of transportation infrastructure networks to road failures. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2024. Vol. 34. Article 013124. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0165839>
3. Wang J., Liao F., Wu J., Sun H., Wang W., Gao Z. Measurement of functional resilience of transport network: The case of the Beijing subway network. *Transport Policy*. 2023. Vol. 140. P. 54–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.06.016>
4. Imran Kays H. M., Momin K. A., Muraleetharan K. K. M., Sadri A. M. A data-driven resilience framework of directionality configuration based on topological credentials in road networks. *arXiv preprint*. 2024. arXiv:2401.07371. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.07371>
5. Mou R., Kang R. Network resilience and rehabilitation strategies for an airport movement area considering traffic flow and road class. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/9998215>
6. Postorino M. N., Sarnè G. M. L. A new approach to assessing transport network resilience. *Urban Science*. 2025. Vol. 9. No. 2. Article 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/urbansci9020035>
7. Amghar R., Jaber S., Moghaddam S. M. H. M., Bhouiri N., Ameli M. Resilience as a service for transportation networks: Definition and basic concepts. *Transportation Research Record*. 2023. Vol. 2678. No. 1. P. 177–189. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981231170180>
8. Bergantino A. S., Gardelli A., Rotaris L. Assessing transport network resilience: Empirical insights from real-world data studies. *Transport Reviews*. 2024. Vol. 44. No. 4. P. 834–857. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2322434>
9. Arabi M., Gerasimidis S., Barchers C., Oke J. Resilience in multilayer transportation infrastructure networks: A review and conceptual framework for equity-based assessment. *Sustainable and Resilient Infrastructure*. 2024. Vol. 9. No. 6. P. 616–639. DOI: <https://doi.org/10.1080/23789689.2024.2344909>
10. Кравцов А. Г., Ларіна Т. Ф., Горяїнов О. М., Козенок А. С., Городецька Т. Е., Бабич І. А. Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч. II. С. 222–230. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230)
11. Войтов В. А., Кравцов А. Г., Войтов А. В., Бережна Н. Г., Сисенко І. І., Кривенко Л. Ф., Бабарика І. Г. Концепція оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку великих міст з урахуванням динамічності зміни впливових факторів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40), ч. II. С. 256–272. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.256-272](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.256-272)
12. Войтов В. А., Кравцов А. Г., Карнаух М. В., Горяїнов О. М., Козенок А. С., Бабич І. А. Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч. I. С. 236–245. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245)
13. Євчук Ю. Ю. Закономірності зміни затримки руху громадського транспорту за різних способів його пріоритизації. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 6. С. 264–271. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/37>
14. Transport system resilience: Summary and conclusions. OECD, 2024. URL: <https://surl.lu/ermezkh>
15. Sun L., Makridis M. A., Genser A., Axenie C., Grossi M., Kouvelas A. Antifragile perimeter control: Anticipating and gaining from disruptions with reinforcement learning. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2402.12665. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.12665>

16. Талєб Н. Антикрихкість та падіння імперій: лекція. Forbes Україна. 2022. URL: <https://surl.li/iewgve>
17. Ding S., Abdel-Aty M., Wang Z. et al. Insights into vehicle conflicts based on traffic flow dynamics. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Article 1536. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50017-3>
18. Saliev D., Mladenov G., Petkov P. Research and analysis of traffic intensity on a street with high traffic load: Case study of Sofia. Engineering Proceedings. 2025. Vol. 100. No. 1. Article 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2025100037>
19. Титар В. В. Системний аналіз транспортної системи національної економіки. Агросвіт. 2024. № 22. С. 167–172. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2024.22.167>
20. Митко М., Бурлака С., Ярошук Р. Аналіз технічних і технологічних форм взаємодії різних видів транспорту. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. № 349(2). С. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-10>

Maksymov S.V., Maksymova O.S., Prystynskyi S.M. ANALYSIS OF TRANSPORT SYSTEM RESILIENCE UNDER CHANGING TRAFFIC INTENSITY

The relevance of the study is driven by the growing intensity of transport flows and the increasing uncertainty in the functioning of transport systems in modern urban environments. Under the influence of global logistics transformations, changing mobility patterns, digitalization of transport services, and – especially – in the context of security challenges, the need for scientifically grounded approaches to ensuring the resilience of transport infrastructure becomes increasingly urgent. The aim of the research is to theoretically substantiate approaches for assessing the resilience of the transport system under conditions of varying traffic intensity and to develop a conceptual model of adaptability and antifragility, taking into account contemporary challenges and trends in transportation network development. The methodological basis of the research comprises network analysis, system-dynamics approach, phase transition theory in traffic flows, critical and comparative analysis of scientific sources, logical-structural synthesis, as well as elements of simulation modeling of transport behavior. The obtained results confirm that the resilience of a transport system is determined by its ability to maintain functional performance parameters under external disruptions and high traffic intensity, while preserving flow controllability and minimizing the risk of transitioning into a congested state. Threshold phenomena indicating critical points of stability loss were identified, and the role of macro- and micro-models in forecasting traffic dynamics was determined. An original concept for strengthening transport system resilience, adaptability, and antifragility was developed, including network redundancy, scenario planning, digital modeling, and institutional learning in traffic management systems. The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed framework to develop transport security strategies, modernize urban traffic management systems, enhance infrastructure preparedness for crisis situations, and optimize transport policy planning at the national and municipal levels.

Key words: population mobility, transport regimes, network analysis, adaptive management, digital transport models.

Дата надходження статті: 04.11.2025

Дата прийняття статті: 21.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 62-93

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/02>

Габовда О.В.

Мукачівський державний університет

Одошевський О.С.

Мукачівський державний університет

ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЗАСОБАМИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ SOLIDWORKS

Парадигма параметричного моделювання, появі якого завдячуємо американській компанії PTC (Parametric Technology Corporation), що випустила у 1987 році програмний продукт Pro/ENGINEER (сучасна назва CreoParametric), використовується у більшості сучасних систем автоматизованого проектування. В статті представлена методика параметричного моделювання черв'ячної передачі з одно, двох – або чотирьох західним архімедовим черв'яком. На відміну від зубчастих передач, де елементи відрізняються тільки параметрами, параметризація черв'ячних передач з використанням інструменту «Рівняння» не практикується через неоднорідність форм їх елементів. Черв'як має гвинтову форму, що передбачає застосування спіралі при його побудові, процес параметричного представлення якої має свої особливості. Але, враховуючи величезні переваги параметризації, пов'язані з ефективністю проектування виробів, автори вважають доцільним створення черв'ячної передачі через параметризацію. Черв'ячні передачі, як й всі механічні передачі, є типовими конструкціями, що масово виготовляються та широко використовуються у промисловості, тому скорочення часу проектування нових моделей передач шляхом зміни параметрів або геометричних співвідношень на даний час є дуже актуальним. Система автоматизованого проектування SolidWorks є лідируючою серед програмних комплексів середнього класу завдяки зручному інтерфейсу, багатofункціональності та наявності гнучкої системи налаштувань. Параметризація за допомогою рівнянь у SolidWorks дозволяє створювати взаємопов'язані параметри елементів зачеплення черв'ячної пари, що автоматично оновлюються при їх зміні. Мета роботи – прискорити процес проектування нових конструкцій черв'ячних передач засобами параметризації SolidWorks, розробивши параметричні моделі черв'яка і черв'ячного колеса, з акцентуванням уваги на способах уникнення параметричних ускладнень при побудові спіралі.

Ключові слова: моделювання, черв'ячна передача, параметризація, математична модель, рівняння, ефективність проектування.

Постановка проблеми. Підвищення ефективності проектування, скорочення термінів випуску нових технічних систем потребує широкого застосування параметризації, яка дає можливість на основі однієї моделі створювати багато подібних конфігурацій шляхом зміни параметрів (розмірів та взаємозв'язків між її компонентами), що значно полегшує роботу конструктора.

Механічні передачі є невід'ємними складовими приводів машин та інших механізмів, тому проектується і масово виготовляються в різно-

манітних модифікаціях. Найбільш розповсюдженими є зубчасті передачі, для яких розроблено багато рішень параметричного моделювання.

На відміну від них, розробка моделей черв'ячних передач не має такої практики у зв'язку з неоднорідністю форм елементів передачі, що ускладнює процес параметризації. Черв'як має форму гвинта з одним чи декількома заходами. Стандартом регламентовано виготовлення одно, двох та чотирьох західних черв'яків. Тому для створення параметричної моделі черв'яка, крім

Уравнения, глобальные переменные и размеры				
Отфильтровать все поля				
Имя	Значение / Уравнение	Равняется	Заметки	
Глобальные переменные				
"m"	= 3.5	3.50	Модуль	
"z1"	= 4	4.00	Кількість заходів червяка	
"z2"	= 50	50.00	Кількість зубів колеса	
"q"	= 12.5	12.50	Коефіцієнт діаметра червяка	
"d1"	= "m" * "q"	43.75	Дільний діаметр червяка	
"da1"	= "m" * ("q" + 2)	50.75	Діаметр вершин червяка	
"df1"	= "m" * ("q" - 2.4)	35.35	Діаметр западин червяка	
"b1"	= int ("m" * (12.5 + 0.09 * "z2"))	59.00	Ширина нарізаної частини червя	
"p"	= pi * "m" * "z1"	43.98	Хід витка спіралі	
Добавить глобальную переменную				

Рис. 1. Глобальні змінні в файлі «Черв'як»

основних параметрів, потрібно враховувати ще три його модифікації, які залежать від кількості заходів черв'яка. Крім того, за формою профілю витків у торцевій площині черв'як може бути архімедів, конволютний та евольвентний. Відмінність у створенні моделей цих черв'яків полягає у виборі положення додаткової площини, що проходить через початок спіралі, на якій буде будуватися профіль кожного з них. Автори статті обмежились дослідженням побудови архімедова черв'яка і відповідного йому черв'ячного колеса.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Параметричне проектування передбачає створення конструктором математичної моделі на основі алгоритму опису кожного компоненту об'єкту. Математична модель є системою рівнянь, «...що описують виділені фізичною моделлю істотні процеси, а також початкові і граничні умови... За допомогою математичного моделювання рішення наукової або інженерної задачі зводиться до вирішення математичної задачі» [1, 2]. «Створення параметризованої конструкції на практиці означає створення алгоритму, який забезпечує синтез конструкції з окремих геометричних елементів, що передбачає можливості модифікації конструкції в певному діапазоні, описує закони функціонування конструкції» [3].

На перевагах параметричного моделювання акцентовано увагу багатьох науковців-практиків, які підкреслюють, що автоматизований спосіб конструювання під час проектування механічних елементів гарантує їх оптимальну функціональність [4-7].

Постановка завдання. Задачею авторів було розробити методику побудови параметричних моделей робочих елементів черв'ячної пари зачеплення у програмному комплексі SolidWorks, застосовуючи інструмент «Рівняння» у зв'язку з відсутністю такої практики.

Виклад основного матеріалу. Моделювання черв'ячної пари з циліндричним архімедовим

черв'яком виконується після попередніх кінематичного та силового розрахунків з подальшим виконанням проектного розрахунку, що передбачає визначення основних геометричних параметрів. Такими параметрами є: модуль зачеплення m , кількість заходів черв'яка z_1 , кількість зубців черв'ячного колеса z_2 , коефіцієнт діаметра черв'яка q . На їх основі розраховуються інші параметри: всі необхідні діаметри, уточнена міжосьова відстань a , довжина нарізаної частини черв'яка b_1 , ширина зубчастого вінця колеса b_2 , хід витка черв'яка p та інші. Основним інструментом параметризації є інструмент «Рівняння», що викликається через пункт меню «Інструменти». На рисунку 1 у вікні «Рівняння, глобальні змінні, розміри» представлені всі глобальні змінні, що беруть участь у процесі параметричного моделювання деталі черв'яка.

Моделювання черв'яка починається з побудови циліндричного тіла за допомогою операції «Повернута бобишка» з подальшим виконанням фаски величиною $2.2m$ (рис. 2).

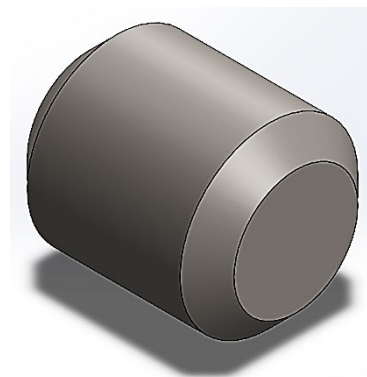


Рис. 2. Заготовка для черв'яка

Гвинтова навивка на циліндричній поверхні моделюється в середовищі SolidWorks за допомогою операції «Виріз за траєкторією», для здійснення якої потрібний ескіз профілю западини

черв'яка та ескіз траєкторії. В якості траєкторії використовується спіраль. Оскільки черв'як може мати один, два та чотири заходи, потрібно виконати спочатку чотири спіралі, попередньо створивши для кожної ескіз (коло, що дорівнює ділильному діаметру черв'яка) (рис. 3) на додатковій площині (елемент «Довідкова Геометрія-Площина»), паралельній торцю заготовки на довільній відстані (10–30 мм).

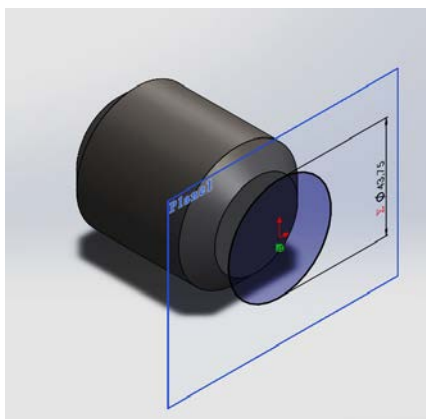


Рис. 3. Побудова додаткової площини та ескізу спіралі на ній

За ескізом будується перша спіраль (інструмент «Гелікоїд і спіраль» елементу «Криві» Менеджера команд). Цей елемент є достатньо специфічним, адже під час створення не піддається параметризації. Параметризація цієї кривої можлива, проте відбувається вона іншим шляхом, а саме: у вікні «Спіраль» попередньо у полі «Крок» вводиться числове значення ходу витка спіралі, кількість обертів вказується довільно (наприклад, 5, але спіраль має вийти за межі заготовки черв'яка), напрямок навивки – за годинниковою стрілкою, після чого необхідно двічі клацнути по спіралі лівою клавішею мишки. В результаті буде отри-

мано доступ до її параметрів, далі необхідно ще раз клацнути по розміру ходу витка спіралі та відкриється вікно «Змінити» в якому вже можна ввести глобальну змінну p – хід витка. Також у вікні «Спіраль» встановлюється кут положення початкової точки. Для першої спіралі він дорівнює 0° (рис. 4). Аналогічно створюються ще три спіралі. Для кожної спіралі на побудованій раніше додатковій площині треба створити окремий ескіз. Початкові кути наступних спіралей – 90° ; 180° та 270° .

Для побудови чотирьох профілів западин черв'яка необхідно створити дві додаткові площини: одна має бути паралельною площині «Зверху», друга – площині «Спереду». Площини мають збігатися попарно з початковими точками спіралей (рис. 5).

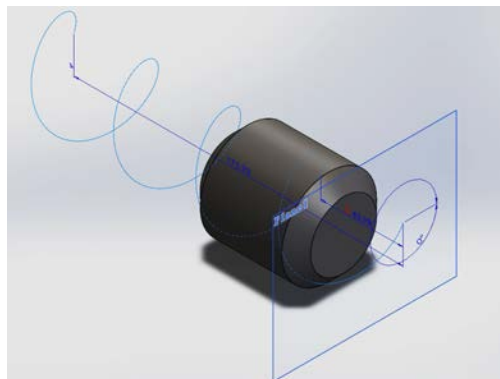


Рис. 4. Побудова спіралі

Під час побудови профілю вирізу додається точка. Між цією точкою та спіраллю встановлюються взаємозв'язок «Точка пронизання», а також проставляється кут профілю 40° , товщина западини, що дорівнює $\pi t/2$, висота ніжки витка величиною $1,2t$ та висота головки витка t . Аналогічно будуються ще три профілі на відповідних

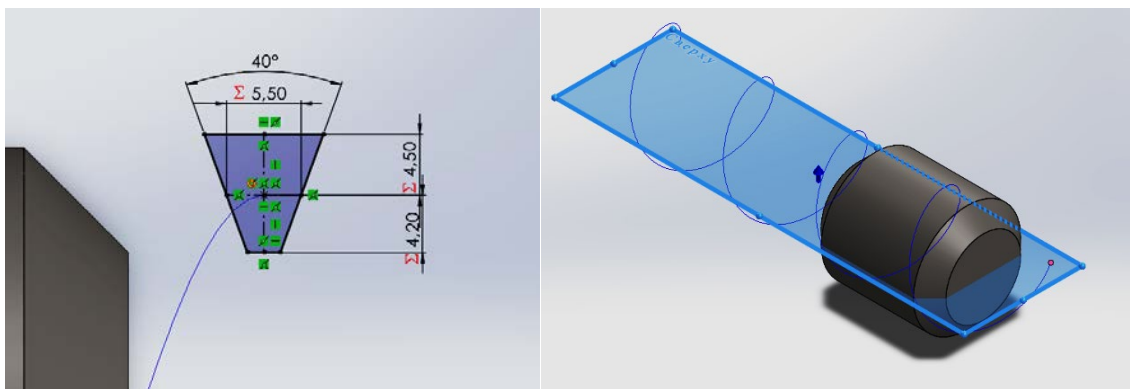


Рис. 5. Створення додаткової площини та ескізу профілю на ній

попередньо побудованих додаткових площинах. Нарізання витків відбувається за допомогою операції «Виріз за траєкторією» (рис. 6).

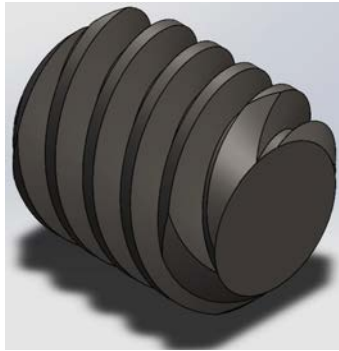


Рис. 6. Результат виконання операції «Виріз за траєкторією»

Для того, аби в межах одного файлу моделі мати можливість змінювати кількість заходів черв'яка, необхідно за допомогою функції *if()* додати погашення елементів в залежності від значення глобальної змінної z_1 . Для цього в інструменті «Рівняння» необхідно додати продемонстровані на рисунку 7 три елементи та прописати функцію *if()* з відповідними аргументами.

Після цього буде отримано можливість змінювати кількість заходів черв'яка. Результат перетворення моделі при зміні глобальних змінних представлено на рисунку 8.

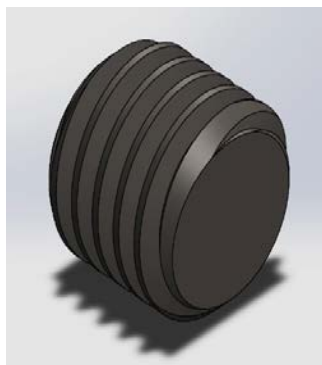
Після створення параметричної моделі черв'яка можна приступати до створення параметричного черв'ячного колеса, враховуючи параметри відповідного черв'яка. Глобальні змінні представлені на рисунку 9. Далі створюється заготовка черв'ячного колеса (рис. 10).

Наступним етапом є побудова траєкторії та профілю вирізу. Траєкторія являє собою спіраль, яка має складатися з двох частин. Для побудови цих двох кривих необхідно створити відповідні ескізи кіл на площині «Справа» (рис. 11). На основі окремо створених ескізів від площини симетрії колеса (у даному випадку площина «Справа») будуються дві частини спіралі по 0,25 обертів, для яких необхідно вказати свої параметри.

Вся траєкторія вирізу буде складатися з двох фрагментів (рис. 12). Після створення двох спіралей обов'язково подвійним натисканням по ним необхідно задати кожній з них хід витка як глобальну змінну.

Имя	Значение / Уравнение	Равняется	Заметки
Глобальные переменные			
"m"	= 3.5	3.50	Модуль
"z1"	= 4	4.00	Кількість заходів червяка
"z2"	= 50	50.00	Кількість зубів колеса
"q"	= 12.5	12.50	Коефіцієнт діаметра червяка
"d1"	= "m" * "q"	43.75	Ділільний діаметр червяка
"da1"	= "m" * ("q" + 2)	50.75	Діаметр вершин червяка
"df1"	= "m" * ("q" - 2.4)	35.35	Діаметр западин червяка
"b1"	= int ("m" * (12.5 + 0.09 * "z2"))	59.00	Ширина нарізаної частини червяка
"p"	= pi * "m" * "z1"	43.98	Хід витка спіралі
Добавить глобальную переменную			
Элементы			
"Cut-Sweep2"	= IIF ("z1" = 1, "suppressed", "unsuppressed")	Не погашен	
"Cut-Sweep3"	= IIF ("z1" = 4, "unsuppressed", "suppressed")	Не погашен	
"Cut-Sweep4"	= IIF ("z1" = 4, "unsuppressed", "suppressed")	Не погашен	
Добавить погашение элемента			

Рис. 7. Створення команди за допомогою функції *if()*



Имя	Значение / Уравнение	Равняется	Заметки
Глобальные переменные			
"m"	= 6.3	6.30	Модуль
"z1"	= 2	2.00	Кількість заходів червяка
"z2"	= 68	68.00	Кількість зубів колеса
"q"	= 20	20.00	Коефіцієнт діаметра червяка
"d1"	= "m" * "q"	126.00	Ділільний діаметр червяка
"da1"	= "m" * ("q" + 2)	138.60	Діаметр вершин червяка
"df1"	= "m" * ("q" - 2.4)	110.88	Діаметр западин червяка
"b1"	= int ("m" * (12.5 + 0.09 * "z2"))	117.00	Ширина нарізаної частини червяка
"p"	= pi * "m" * "z1"	39.58	Хід витка спіралі
Добавить глобальную переменную			

Рис. 8. Модель двозаходного черв'яка

Имя	Значение / Уравнение	Равняется	Заметки
☐ Глобальные переменные			
"m"	= 3.5	3.50	Модуль
"z1"	= 4	4.00	Кількість заходів червяка
"z2"	= 50	50.00	Кількість зубів колеса
"q"	= 12.5	12.50	Коефіцієнт діаметра червяка
"a"	= "m" * ("q" + "z2") / 2	109.38	Міжосьова відстань
"alpha"	= 20	20.00	Кут зачеплення
"d2"	= "m" * "z2"	175.00	Ділильний діаметр колеса
"db2"	= "d2" * cos ("alpha")	164.45	Діаметр основного кола
"da2"	= "m" * ("z2" + 2)	182.00	Діаметр вершин
"df2"	= "m" * ("z2" - 2.4)	166.60	Діаметр западин
"dam"	= "da2" + 6 * "m" / ("z1" + 2)	185.50	Максимальний діаметр колеса
"b2"	= int (0.67 * "m" * ("q" + 2))	34.00	Ширина вінця
"p"	= pi * "m" * "z1"	43.98	Хід витка спіралі
Добавить глобальную переменную			

Рис. 9. Глобальні змінні у файлі «Черв'ячне колесо»



Рис. 10. Модель заготовки черв'ячного колеса

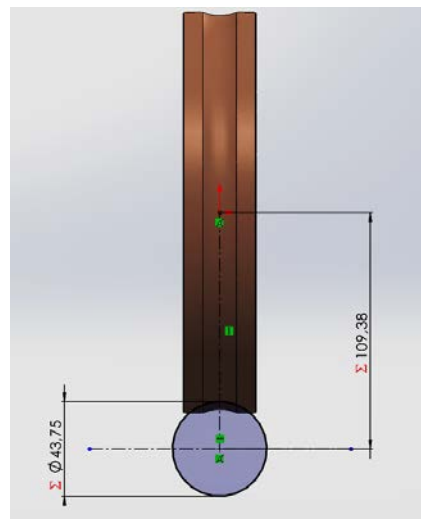


Рис. 11. Створення ескізів для побудови спіралей

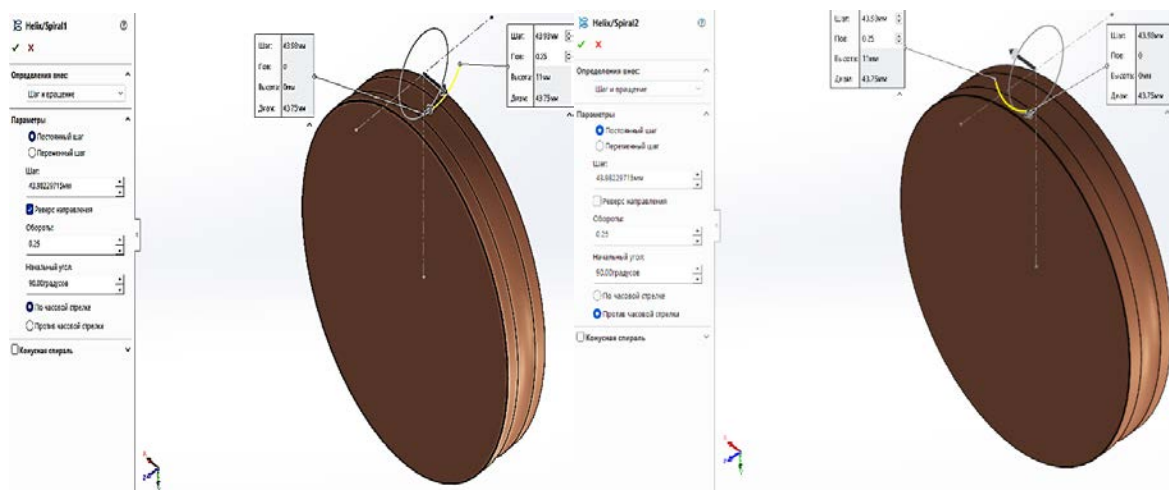


Рис. 12. Побудова окремих частин потрібної спіралі

Для побудови профілю вирізу необхідно створити відповідні ескізи на додаткових площинах, які проходять через точки на кінцях спіралей паралельно площині «Зверху». На створених елементах довідкової геометрії будуються

два ідентичні профілі, один з яких показано на рисунку 13.

Після цього здійснюється операція «Виріз за траєкторією». Аналогічно все проводиться з іншого боку, після чого в утвореній запа-

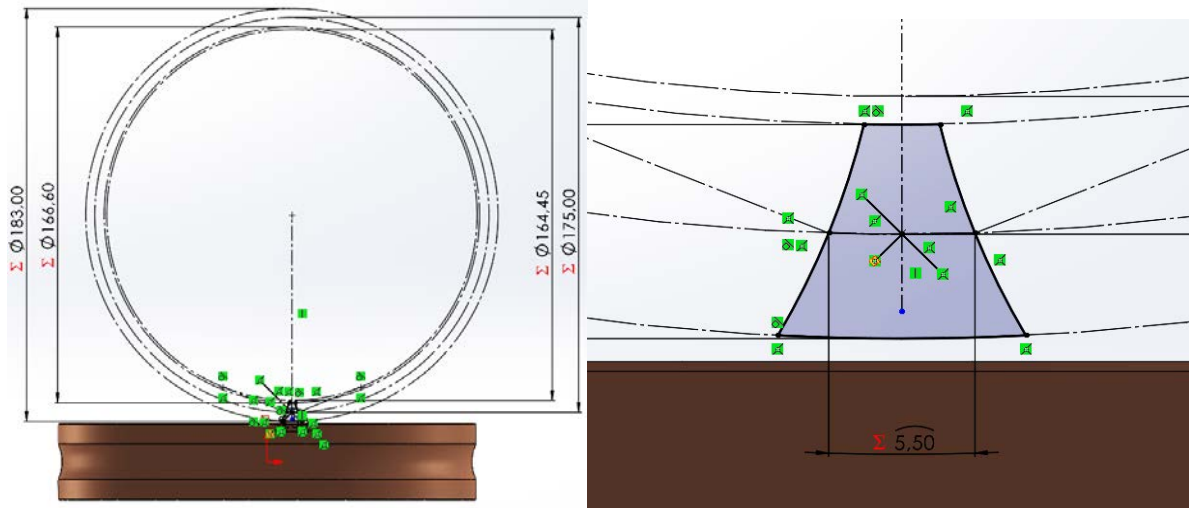


Рис. 13. Побудова допоміжної площини та ескіз профілю западини колеса

дині робиться заокруглення величиною $0.2m$ та робиться круговий масив з вказанням кількості екземплярів рівній глобальній змінній z_2 . В результаті буде отримано готову параметричну модель черв'ячного колеса (рис. 14).

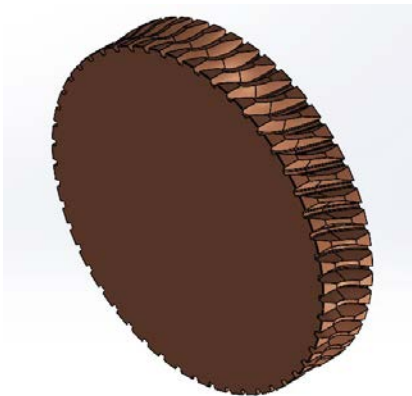
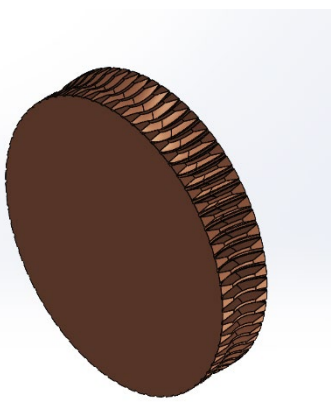


Рис. 14. Готова параметрична модель черв'ячного колеса

Результат перетворення моделі при зміні глобальних змінних представлено на рисунку 15.

Висновки. Було проаналізовано дослідження науковців-практиків, які працювали над питаннями параметричного моделювання технічних об'єктів машинобудівної галузі. Актуальність даного дослідження обумовлена потребами української промисловості в прискоренні процесу цифровізації виробництва. Осучаснення, зокрема, полягає у застосуванні параметричного моделювання під час проектування виробів, адже це дає можливість отримувати в межах єдиного файлу різні модифікації однієї і тої самої деталі.

За допомогою програмного комплексу SolidWorks було розроблено параметричні моделі черв'ячної пари на основі їх математичного опису. Параметричне моделювання автоматизує виконання різних завдань конструкторами під час проектування виробів. Розробка способів параметризації інших виробів різноманітного призначення є перспективами досліджень авторів.



Имя	Значение / Уравнение	Равняется	Заметки
Глобальные переменные			
"m"	= 6.3	6.30	Модуль
"z1"	= 2	2.00	Кількість заходів червяка
"z2"	= 68	68.00	Кількість зубів колеса
"q"	= 20	20.00	Коефіцієнт діаметра червяка
"a"	= "m" * ("q" + "z2") / 2	277.20	Мікосьова відстань
"alpha"	= 20	20.00	Кут зачеплення
"d2"	= "m" * "z2"	428.40	Дільний діаметр колеса
"db2"	= "d2" * cos ("alpha")	402.56	Діаметр основного кола
"da2"	= "m" * ("z2" + 2)	441.00	Діаметр вершин
"df2"	= "m" * ("z2" - 2.4)	413.28	Діаметр западин
"dam"	= "da2" + 6 * "m" / ("z1" + 2)	450.45	Максимальний діаметр колеса
"b2"	= int (0.67 * "m" * ("q" + 2))	92.00	Ширина вінця
"p"	= pi * "m" * "z1"	39.58	Хід витка спіралі

Рис. 15. Черв'ячне колесо для двозахідного червяка

Список літератури:

1. Ворошук В.Я. SolidWorks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем. Навч. посібник / В.Я. Ворошук, Т.М. Вітенько. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2021. 164 с.
2. Understanding the power of parametric modeling. URL: <https://www.3ds.com/store/cad/parametric-modeling>.
3. Тарандушка Л.А., Йовченко А.В. Параметричне проектування 3D-моделі кривошипно-шатунного механізму автомобіля з використанням САПР SolidWorks. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч.ІІ, С. 195–201. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.195-201](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.195-201)
4. Gordillo G.B., Rey G.G. Parametric Geometric Modeling of a Spur Gear Using SolidWorks. GEARsolutions. February 2017. URL: https://gearsolutions.com/media/uploads/uploads/assets/Digital_Editions/2017/201702/0217-Gearsolutions.pdf.
5. Rahman A., Kumar A.. Geometry Modeling of a Spur Gear using Parametric Equation & Global Variables. Research Square. April 2024. DOI:10.21203/rs.3.rs-4263821/v1.
6. Minggang Xu, Mingyue Ma, Zhe Wang and Zuhuang Liu. Parametric design research of large-scale high –speed shaft system detection device based on SolidWorks. Journal of Physics: Conference Series 2803 (2024) 012052. International Conference on Electrical Technology and Automation Engineering. DOI: 10.1088/1742-6596/2803/1/012052.
7. Теоретичні основи структурно-параметричного геометричного моделювання виробів машинобудування : монографія / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко, П.М. Яблонський. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 223 с.

Habovda O.V., Odoshevskiy O.S. PARAMETRIC MODELING OF A WORM GEAR USING SOLIDWORKS SOFTWARE

The paradigm of parametric modeling, introduced by the American company PTC (Parametric Technology Corporation), which released the software product Pro/ENGINEER (currently Creo Parametric) in 1987, is used in most modern computer-aided design systems. The article presents a method for parametric modeling of a worm gear with a single-, double-, or four-start Archimedean worm. Unlike spur gears, where elements differ only by parameters, the parameterization of worm gears using the “Equations” tool is not commonly practiced due to the structural heterogeneity of their elements. The worm has a helical form, which requires the use of a spiral during its construction, and its parametric representation has unique features. However, considering the significant advantages of parameterization associated with improved design efficiency, it is advisable to create worm gears using a parameterization approach. Worm gears, like all mechanical transmissions, are standard components that are produced on a large scale and widely used in industry. Therefore, reducing the time required to design new models by modifying parameters or geometric relationships is highly relevant. SolidWorks is a leading mid-range CAD system due to its user-friendly interface, multifunctionality, and flexible configuration options. Parameterization using equations in SolidWorks enables the creation of interrelated parameters for the elements of a worm gear pair that automatically update when modified. The aim of the work is to accelerate the design process of new worm gear constructions in SolidWorks by developing parametric models of the worm and worm wheel, with emphasis on methods for avoiding parametric complications during spiral generation.

Key words: modeling, worm gear, parameterization, mathematical model, equations, design efficiency.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Ремінь А.В.

Одеський національний морський університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОАКТИВНОСТІ ПРИВОДУ КАБЕЛЬНОГО БАРАБАНУ ПРИЧАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Сучасний технічний прогрес призвів до того, що машини та інше важке обладнання стали невід'ємною складовою повсякденного життя людини. Щоденно пристрої виконують мільйони операцій різного рівня складності та важливості. Жодне сучасне підприємство, фабрика чи завод не здатні ефективно функціонувати або конкурувати без застосування подібного обладнання. Водночас науковці продовжують удосконалювати технології, прагнучи до ще вищих показників розвитку.

Ще кілька десятиліть тому створені машини здавалися вершиною технічного прогресу, проте сьогодні на зміну їм приходять нові зразки, здатні виконувати роботу кількох попередніх із більшою швидкістю, точністю та ефективністю. Такий технологічний прорив значно підвищив продуктивність, але водночас збільшив навантаження на обладнання. Як наслідок, окремі деталі машин піддаються інтенсивнішому зносу. Вихід з ладу навіть однієї складової може спричинити пошкодження інших елементів або поломку всієї установки. Зупинка роботи обладнання на підприємстві може призвести до простою виробництва, економічних втрат і зниження конкурентоспроможності. У деяких випадках пошкодження є настільки серйозними, що ремонт стає недоцільним і виникає потреба у заміні окремих вузлів чи навіть усієї машини.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває необхідність діагностування технічного стану механізмів портових кранів. Одним із найефективніших методів контролю є вібродіагностика. Її застосування дає змогу виконувати широкий спектр статистичних досліджень на основі аналізу періодичних і квазіперіодичних випадкових процесів, зокрема проводити спектрально-кореляційний аналіз модулюючих стаціонарних компонентів, що містять інформацію про характер дефектів. Діагностичні ознаки формуються за допомогою ймовірнісних характеристик першого та другого порядків, що дозволяє виявляти дефекти механізмів на ранніх етапах їхнього розвитку.

Ключові слова: вібродіагностика, кабельний барабан, методи вібродіагностики, причальний контейнерний перевантажувач, дослідження віброактивності, віброактивність.

Постановка проблеми. Підшипники кочення, що працюють у портових механізмах, піддаються впливу агресивного морського середовища, підвищеної вологості, солей та змінних навантажень. Це призводить до поступового руйнування доріжок кочення та появи мікротріщин, які збільшують рівень вібрації.

Сучасні причальні контейнерні перевантажувачі є ключовими елементами портової логістики, забезпечуючи швидке та ефективне завантаження та розвантаження контейнерів на судах. Одним із основних вузлів цих машин є привод кабельного барабану, який відповідає за підйом і опускання вантажів, передачу електроживлення та забезпечення безпечної роботи крана. Ефективна та надійна робота цього механізму є критичною для

забезпечення безперервного функціонування портових терміналів, а будь-які порушення в його роботі можуть призводити до значних виробничих та економічних втрат.

Однією з основних причин несправностей приводу кабельного барабану є підвищена віброактивність, яка виникає під впливом циклічних динамічних навантажень, інтенсивних робочих циклів, зміни маси вантажів, нерівномірності тросових механізмів, а також зовнішніх факторів, таких як вітер, корозія та температурні коливання. Інтенсивна вібрація призводить до прискореного зношування підшипників, редукторів, муфт та інших елементів механізму, що в свою чергу знижує термін служби обладнання, підвищує ризик аварійних зупинок і зменшує ефективність експлуатації крана.

Сучасні методи технічного контролю, зокрема вібродіагностика, дозволяють проводити раннє виявлення дефектів, визначати стан вузлів та прогнозувати залишковий ресурс обладнання. Проте наявні наукові та практичні дослідження, зокрема роботи Гребенюка В.І. (2019) та Пономаренка С.П. (2021), а також міжнародні стандарти ISO 10816-3 [2, с. 52], в основному охоплюють загальні підходи до оцінки вібрацій машин та діагностики підшипників, але не враховують комплексну специфіку приводу кабельного барабану причального контейнерного перевантажувача. Це створює необхідність у проведенні спеціалізованих досліджень, спрямованих на визначення особливостей віброактивності цього вузла та розробку методів підвищення його надійності.

Таким чином, ключова проблема дослідження полягає у відсутності системного підходу до вивчення віброактивності приводу кабельного барабану, що ускладнює своєчасне виявлення дефектів та оптимізацію режимів експлуатації крана. Вирішення цієї проблеми дозволить не лише підвищити ефективність і безпеку роботи перевантажувачів, а й зменшити витрати на ремонт та обслуговування, що має особливе значення для сучасних портових терміналів із високим рівнем вантажопотоку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження технічного стану механізмів причальних контейнерних перевантажувачів та, зокрема, приводів кабельних барабанів, є предметом інтенсивної уваги вітчизняних і міжнародних науковців. Значною мірою розвиток сучасних методів оцінювання віброактивності базується на положеннях класичної та прикладної вібродіагностики, викладених у фундаментальних працях провідних авторів.

Одним із ключових джерел, що формують методологічну базу дослідження вібраційних процесів у машинобудуванні, є монографія Гребенюка В.І. «Діагностика машин за вібраційними сигналами» (2019). У роботі ґрунтовно розглянуті закономірності формування вібраційних сигналів у механічних системах, викладено принципи спектрального аналізу, методи оброблення стохастичних коливань та моделювання вібраційних характеристик [1, с. 17]. Автором підкреслюється важливість використання комплексних показників – енергетичних, статистичних та спектральних – для своєчасного виявлення дефектів. Для механізмів портових перевантажувачів, де навантаження мають циклічний характер, зазначені підходи є особливо актуальними.

Суттєвий внесок у розробку методів діагностики пошкоджень підшипникових вузлів, які є одними з найважливіших елементів приводу кабельного барабану, зроблено в роботі Пономаренка С.П. «Вібраційна діагностика підшипників кочення» (2021). У ній детально проаналізовано процеси зародження дефектів на доріжках кочення та елементах підшипників, наведено методики визначення характерних частот пошкоджень та запропоновано алгоритми їх виявлення за допомогою спектральних і кореляційних показників. Дослідження Пономаренка особливо важливе, оскільки саме підшипникові вузли приводу кабельного барабану зазнають підвищених динамічних навантажень у режимах роботи контейнерного перевантажувача [3, с. 9].

Актуальні проблеми експлуатації контейнерних перевантажувачів у портових умовах розглянуто в публікаціях журналу «Морські порти України», №4 за 2023 рік. У науково-практичних статтях цього видання акцентується увага на необхідності своєчасної діагностики електромеханічних приводів, аналізуються випадки підвищеної вібраційної активності механізмів, наведено практичні приклади відмов, пов'язаних з нерегулярною технічною діагностикою кабельних барабанів на портових кранах [4, с. 5]. Окремі матеріали журналу підкреслюють зростання впливу динамічних навантажень у зв'язку з пришвидшенням робочих циклів сучасних контейнерних перевантажувачів, що додатково підтверджує актуальність дослідження віброактивності таких механізмів.

Таким чином, аналіз останніх наукових джерел свідчить про значну увагу до проблем вібраційного моніторингу та технічної діагностики приводів і несучих елементів вантажопідіймальних машин. Проте комплексні дослідження віброактивності приводу саме кабельного барабану причального контейнерного перевантажувача, що працює в умовах циклічних навантажень, інтенсивних термічних та вітрових впливів, залишаються обмеженими. Це зумовлює необхідність подальшого поглиблення аналітичних та експериментальних підходів для забезпечення підвищення ефективності та надійності його експлуатації.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методів вібродіагностики для дослідження віброактивності приводу кабельного барабану причального контейнерного перевантажувача для забезпечення підвищення його ефективної експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Високі вимоги до надійності роботи контейнерних перевантажу-

вачів у портах зумовлюють необхідність пошуку та впровадження нових методів їх технічної діагностики під час експлуатації. Підвищення рівня надійності цих систем досягається завдяки розробці ефективних способів контролю стану окремих конструктивних елементів.

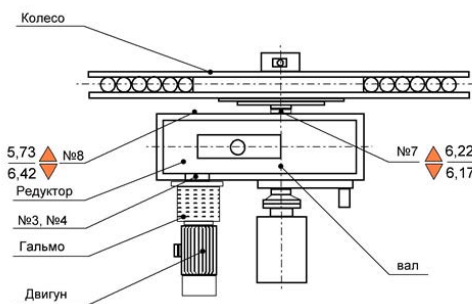
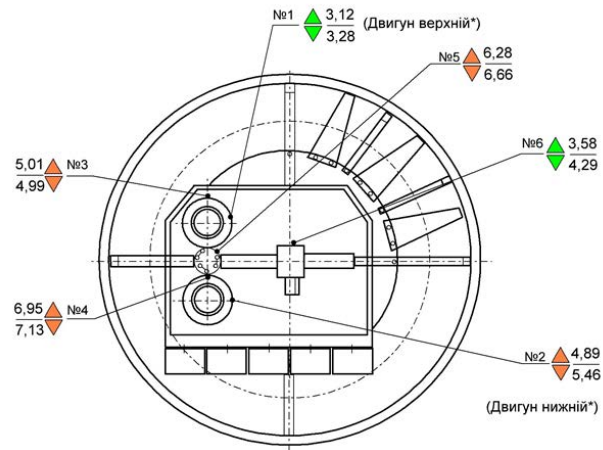
Одним із ключових завдань цього напрямку є забезпечення діагностики технічного стану механізму підйому вантажу, оскільки наявність прихованих дефектів його складових може спричинити аварійні ситуації та небажані простої.

Застосування методів вібродіагностики дозволяє проводити широкий спектр статистичних досліджень, що ґрунтуються на аналізі періодичних та квазіперіодичних випадкових процесів. Зокрема, здійснюється виділення та спектрально-кореляційний аналіз модулюючих стаціонарних компонентів, які містять важливу інформацію про характер дефектів. Діагностичні ознаки формуються на основі імовірнісних характеристик першого та другого порядків, причому саме за показниками другого порядку можливо виявити дефекти механізмів на ранніх етапах їх розвитку.

Було здійснено вимірювання та реєстрацію вібраційних сигналів підшипникових вузлів механізму кабельного барабана спредера причального контейнерного перевантажувача «ZPMC», заводський № ZP06-799-1, інвентарний № 7001.

На основі зареєстрованих сигналів віброприскорення отримано їхні реалізації, для кожного з яких обчислено середньоквадратичне значення (СКЗ) сигналу. Результати вимірювань, виконаних під час роботи приводу без навантаження під спредером, наведено у таблиці 1. У ній подано середньоквадратичні значення (СКЗ) сигналів вібрації, зафіксованих у контрольних точках приводу механізму відповідно до вимог стандартів ISO 10816-1:2007 та ISO 2372.

Результати дослідження підтверджують, що аналіз вібрації – це ефективний метод діагностики технічного стану підшипників. Регулярний



* – позначення умовне

Рис. 1. Контрольні точки для реєстрації вібраційних сигналів приводу кабельного барабана спредера були визначені на корпусах підшипникових вузлів. У кожній точці здійснювався запис сигналів вібрації під час роботи механізму в режимах підйому та опускання спредера із застосуванням давачів віброприскорення ДВ3-70. Частота дискретизації вібраційних сигналів була сталою для всіх підшипникових вузлів і становила 10 кГц, а тривалість запису однієї реалізації сигналу для кожного підшипника – 5 с

моніторинг дає змогу виявляти дефекти на ранніх етапах і підвищувати надійність обладнання.

Висновки. Сучасне обладнання, якщо воно оснащено новітніми технологічними рішеннями,

Таблиця 1

№ точки	Найменування вузла	Фактичне значення СКЗ, м/с ²		Граничне значення СКЗ
		при підйомі	при опусканні	
1	Електродвигун верхній	3,12	3,28	4,4
2	Електродвигун нижній	4,89	5,46	4,4
3	Редуктор	5,01	4,99	4,4
4	-//-	6,95	7,13	4,4
5	-//-	6,28	6,66	4,4
6	-//-	3,58	4,29	4,4
7	-//-	6,22	6,17	4,4
8	-//-	5,73	6,42	4,4

має дуже високу вартість і дороге в обслуговуванні. Тому необхідно думати про надійність використовуваної техніки і залучати новітні технології діагностування обладнання. Апаратура певного підприємства потребує періодичного огляду. Здійснити заміну деталі певного вузла машини або вчинити необхідні заходи щодо зупинення розвитку дефекту. Варто зазначити, що огляд обладнання необхідно проводити не лише в період виконання ним своїх функцій, а і в період виробництва. Нерідко причиною виходу з ладу машини стає використання деталей, в яких було допущено дефект ще при виготовленні.

Проведений аналіз літератури та сучасних досліджень у сфері вібродіагностики показав, що оцінка технічного стану приводів кабельних барабанів причальних контейнерних перевантажувачів є критично важливою для забезпечення їх ефективної та безперервної експлуатації. Існуючі підходи, описані у працях Гребенюка В. І. (2019) та Пономаренка С. П. (2021), а також стандартизовані методики ISO 10816-3, дозволяють виявляти дефекти підшипників та інших механічних елементів на ранніх стадіях, однак вони не завжди враховують специфіку динамічних навантажень, циклічності робочих циклів і конструктивних особливостей приводів кабельних барабанів саме причальних контейнерних кранів.

Результати досліджень свідчать про наявність підвищеної віброактивності приводів, що призводить до прискореного зношування підшипників, редукторів та муфт. Недооцінка цього фактору може стати причиною аварійних зупинок, простоїв виробництва та значних економічних втрат. Разом з тим, систематичне застосування вібродіагностичних методів дозволяє:

1. Виявляти дефекти механізмів на ранніх етапах розвитку, що забезпечує своєчасне планування технічного обслуговування.

2. Оптимізувати режими експлуатації приводу, зменшуючи ризик виникнення аварійних ситуацій.

3. Підвищувати термін служби вузлів механізму та загальну надійність контейнерного перевантажувача.

4. Впроваджувати цифрові системи моніторингу, що інтегруються із системами управління портовими терміналами для оперативного контролю стану обладнання.

Таким чином, комплексне дослідження віброактивності приводу кабельного барабану дозволяє не лише підвищити ефективність роботи кранів, але й забезпечити економічну доцільність їх експлуатації. Подальші наукові дослідження мають бути спрямовані на розробку:

- математичних моделей прогнозування віброактивності та залишкового ресурсу вузлів приводу;
- адаптивних алгоритмів обробки вібраційних сигналів, що враховують нестабільність навантажень;
- інтегрованих систем вібромоніторингу із можливістю дистанційного контролю та раннього попередження про потенційні відмови.

Реалізація цих напрямів сприятиме створенню «розумних» портових терміналів, де обладнання функціонуватиме з максимальною надійністю та продуктивністю, а управління його експлуатацією базуватиметься на точних та своєчасних даних про технічний стан механізмів.

Результати дослідження підтверджують, що аналіз вібрацій – це ефективний метод діагностики технічного стану підшипників. Регулярний моніторинг дає змогу виявляти дефекти на ранніх етапах і підвищувати надійність обладнання.

Список літератури:

1. Гребенюк В. І. Діагностика машин за вібраційними сигналами. – Київ : Техніка, 2019.
2. ISO 10816-3: Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
3. Пономаренко С. П. Вібраційна діагностика підшипників кочення. Одеса : НУ 'ОМА', 2021.
4. Журнал «Морські порти України». №4. 2023.

Remin A.V. RESEARCH OF THE VIBROACTIVITY OF THE CABLE DRUM DRIVE OF A QUAY CONTAINER CRANE TO ENSURE THE IMPROVEMENT OF ITS EFFICIENT OPERATION

Modern technological progress has led to machines and other heavy equipment becoming an integral part of human everyday life. Every day, devices perform millions of operations of varying complexity and importance. No modern enterprise, factory, or plant can function effectively or remain competitive without using such equipment. At the same time, researchers continue to improve technologies, striving for even higher levels of advancement.

A few decades ago, existing machines seemed to represent the peak of technological progress, but today they are being replaced by new models capable of performing the work of several previous generations with greater speed, precision, and efficiency. Such technological breakthroughs have significantly increased productivity;

however, they have also increased the load on equipment. As a result, individual machine components are subjected to more intensive wear. The failure of even a single component can cause damage to other elements or even lead to the breakdown of the entire system. Equipment downtime at an enterprise may result in production interruptions, economic losses, and reduced competitiveness. In some cases, the damage is so severe that repairs become impractical, making it necessary to replace certain assemblies or even the entire machine.

In this context, the need to diagnose the technical condition of port crane mechanisms becomes particularly relevant. One of the most effective control methods is vibration diagnostics. Its application makes it possible to carry out a wide range of statistical studies based on the analysis of periodic and quasi-periodic random processes, including spectral-correlation analysis of modulating stationary components that contain information about the nature of defects. Diagnostic indicators are formed using probability characteristics of the first and second orders, which allows for the detection of mechanism defects at early stages of their development.

Key words: *vibration diagnostics, cable drum, vibration diagnostics methods, quay container crane, vibroactivity research, vibroactivity.*

Дата надходження статті: 21.11.2025

Дата прийняття статті: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Селезньов М.Є.

Державний університет економіки і технологій

Боровік П.В.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РОЗДІЛОВОГО ПРОЦЕСУ НА МЕТАЛОЄМНІСТЬ НОЖИЦЬ З ШЕВРОННИМ НОЖЕМ

У статті, на підставі результатів проведеного математичного моделювання, представлено аналіз впливу основних технологічних параметрів процесу поперечного розрізання плоского металопрокату на металоємність проєктованих ножиць з шевронним ножем. Зокрема, показаний вплив максимальної товщини, ширини та межі міцності розрізуваного плоского металопрокату, а також кута нахилу прямолінійних площин різальної кромки застосовуваного шевронного ножа, шляхом математичного моделювання процесу розрізання з варіюванням зазначених технологічних параметрів в діапазонах, що є актуальними при розробленні нових та вдосконаленні існуючих ножиць з шевронним ножем. За результатами проведеного математичного моделювання отримані залежності маси проєктованих ножиць з шевронним ножем від основних технологічних параметрів розділової операції та дана оцінка впливу кожного з них. При цьому, в модельованих діапазонах варіювання технологічних параметрів розглянутої розділової операції, найбільш інтенсивний вплив на металоємність ножиць має ширина розрізуваного плоского металопрокату, що є очікуваним, оскільки вона безпосередньо зумовлює ширину металокопії проєктованих ножиць з шевронним ножем. Крім того встановлено, що кут нахилу прямолінійних площин різальної кромки шевронного ножа також має суттєвий вплив на металоємність ножиць, при цьому залежність маси ножиць від цього технологічного параметру, в модельованому діапазоні, має зворотній нелінійний характер з явною зміною інтенсивності. Таким чином, при висуненні та впровадженні пропозицій щодо виготовлення, ножиць для розрізання плоского металопрокату шевронним ножем, потрібна комплексна оцінка впливу основних технологічних параметрів розділового процесу як на металоємність проєктованих ножиць, так і на якість готової продукції. Результати виконаного дослідження можуть бути в подальшому використані при розробці, тестуванні та впровадженні програмного забезпечення для автоматизованого проєктування технології та обладнання процесу поперечного розрізання плоского металопрокату на ножицях з шевронним ножем.

Ключові слова: ножиці, розрізання, плоский металопрокат, технологічні параметри, металоємність, математичне моделювання.

Постановка проблеми. Доля плоского металопрокату займає відносно велику частку в загальному обсязі продукції металургійних виробництв, що зумовлено зростаючим попитом у різних галузях промисловості. В умовах сучасних ринкових викликів, таких як енергетична ефективність, екологічні стандарти та автоматизація виробництва, металургійні підприємства змушені не лише збільшувати обсяги випуску, а й модернізувати обладнання. Це вимагає впровадження новітніх, більш ефективних машин і механізмів, здатних забезпечити високу продуктивність та якість кінцевої продукції.

Велику частину плоского металопрокату становлять листи та штаби товщиною від 5 до 80 мм і шириною від 600 до 4800 мм. Виготовлення такої продукції передбачає виконання розділових операцій на різних етапах технологічного процесу – як під час прокатки, так і на завершальних стадіях формування готової металопродукції. Враховуючи сучасні вимоги до точності геометричних параметрів і механічних властивостей, якість цих операцій безпосередньо впливає на конкурентоспроможність виробів та їх відповідність міжнародним стандартам.

Ефективне розрізання на мірні довжини плоского металопрокату найчастіше здійснюється за

допомогою ножиць, різних типів які забезпечують високопродуктивне розділення матеріалу методом зсуву та гарантують при цьому необхідну якість готової продукції. [1-3]. Варто відзначити, що цей метод розділення металу є більш ефективним в порівнянні зі способами механічного різання, які супроводжуються частковим видаленням матеріалу із зони розділення, або термічними методами, які супроводжуються обов'язковим локальним нагріванням металу в зонах наближених до місця розділення [4, 5]. Реалізація розділення методом зсуву (розрізання) дає змогу виготовляти плоский металопрокат необхідної форми та розмірів із мінімальними втратами матеріалу, виключаючи зміну механічних властивостей, яка може виникати при термічних методах розділення [5]. При цьому для реалізації процесу поперечного розділення плоского металопрокату широко застосовуються ножиці з похилим (гільйотинним) та двосхилим (шевронним) ножем [6-8]. Такі ножиці дозволяють розрізати плоский металопрокат товщиною понад 30 мм та шириною понад 2300 мм з високою точністю та продуктивністю [7].

Слід зазначити, що для поперечного розрізання плоского металопрокату можуть застосовуватися й ножиці з дуговою формою ножа, коли дуговий ніж перекочується по відношенню до нижнього ножа, що дозволяє локалізувати зону розрізання та мінімізувати дефекти розділених частин. Такі ножиці дозволяють ефективно виконувати поперечне розділення плоского металопрокату, проте мають більш складну кінематику, та, відповідно, більшу металоємність у порівнянні з ножицями з гільйотинним чи шевронним ножами. Тому саме ножиці з похилими ножами представляються більш перспективними, та становлять значну частину номенклатури обладнання, яке виробляється для оснащення ліній розрізання сучасних прокатних станів, що спеціалізуються на виготовленні плоского металопрокату.

В умовах сучасного машинобудівного виробництва, ще на етапі попередньої обробки потенційного замовлення на поставку (виготовлення) ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату похилим ножем, фахівцю досить часто необхідно попередньо визначити собівартість проєктованих ножиць, яка значною мірою залежить від їх металоємності та технологічних умов реалізації процесу розділення. Ця задача потребує врахування широкого спектру факторів, які мають вплив як на енергосилові параметри розділової операції, так і на якість готової металопродукції [2, 8, 9]. При цьому адекватна оцінка собівартості проєктованих ножиць може бути виконана з використанням сучасних засобів математичного моделювання, розвиток яких потребує глибокого розуміння характеру впливу параметрів процесу розрізання плоского металопрокату на металоємність проєктованих ножиць.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [7], на базі відомих даних про металоємність існуючих ножиць та їх технологічні характеристики, була розроблена математична модель, яка дозволяє визначати металоємність проєктованих ножиць, з урахуванням максимальної сили розрізання та максимальної ширини розрізуваного плоского металопрокату. Однак наявні результати не дозволяють сформулювати глибокого обґрунтованого уявлення про характер впливу основних технологічних параметрів процесу розрізання плоского металопрокату на металоємність проєктованих ножиць. Тому, з точки зору створення нових ножиць для поперечного різання плоского металопрокату з похилим ножем та можливими унікальними характеристиками, представляється доцільним виконати математичне моделювання даної розділової операції в деякому можливому діапазоні варіювання основних технологічних параметрів, з метою виявлення оптимальних умов її реалізації, та з урахуванням показників якості готової металопродукції, що і було покладено в основу при формуванні мети даної роботи.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз впливу основних технологічних параметрів розділової операції на металоємність проєктованих ножиць з двосхилим (шевронним) ножем, використовуваних для поперечного розрізання плоского металопрокату, на базі математичної моделі, яка дозволяє визначати металоємність проєктованих ножиць.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення зазначеної мети, в рамках даної роботи, була виконана чисельна реалізація математичної моделі залежності металоємності ножиць з похилим ножем від сили розрізання та максимальної ширини розрізуваного плоского металопрокату, яка має наступний вигляд [7, с. 141]:

$$M = B (0,39 + 0,04 N^{0,49} \ln(N)),$$

де B – максимально допустима ширина розрізуваного плоского металопрокату, мм;

N – максимально допустима сила розрізання, кН.

Чисельна реалізація зазначеної математичної моделі виконувалася з варіюванням основних технологічних параметрів розділової операції у діапазонах, які є актуальними при проєктуванні сучасних ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату похилим ножем. При цьому розрахунок величини максимальної сили розрізання виконувався для класичного шевронного ножа, за методикою, представленою в роботі [8]. При моделюванні, розрахунок металоємності ножиць виконувався в залежності від наступних основних параметрів процесу поперечного розрізання: товщина (10...25 мм), ширина (1500...2500 мм) та межа міцності (300...800 МПа) розрізуваного плоского металопрокату. Також варіювався кут

нахилу прямолінійних площин шевронного ножа в межах $1,2^\circ \dots 3^\circ$

На рис. 1 представлені отримані залежності маси M проєктованих ножиць від максимальної товщини h розрізуваного плоского металопрокату. Дані залежності отримані для випадків розрізання плоского металопрокату товщиною 10...25 мм та шириною 2000 мм з трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа) шевронним ножом з кутом нахилу прямолінійних площин 3° .

Представлені залежності мають виражений прямий лінійний характер, що є досить очікуваним, враховуючи, що максимальна товщина розрізуваного плоского металопрокату є одним з визначальних факторів, які впливають на енергосилові параметри реалізації розділової операції і, як наслідок, металоємність необхідних ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату. При цьому, середній приріст маси необхідних ножиць на кожні додаткові 10% від початкової максимальної товщини плоского металопрокату, в модельованих умовах, становить 991 кг, 1402 кг та 1910 кг для трьох прийнятих умовних марок сталі, відповідно.

Також виконувалось математичне моделювання процесу поперечного розрізання шевронним ножом плоского металопрокату з варіюванням його максимальної ширини в діапазоні 1500...2500 мм. На рис. 2 представлені отримані залежності маси M проєктованих ножиць від максимальної ширини B розрізуваного плоского металопрокату. Представлені залежності отримані при моделюванні процесу розрізання плоского металопрокату товщиною 25 мм, як і у попередньому випадку, з трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа), шевронним ножом з кутом нахилу прямолінійних площин 3° .

Дані залежності також є прямими та наближеними до лінійних, це може пояснюватися тим, що ножиці для поперечного розрізання плоского металопрокату з шевронним ножом часто мають досить типову конструкцію, яка при проєктуванні може бути пропорційно масштабована для забезпечення розрізання більшої максимальної ширини плоского металопрокату. В даному випадку, середній приріст маси необхідних ножиць на кожні додаткові 10% від початкової максимальної ширини плоского металопрокату, в модельованих умовах, для зазначених умовних марок сталі, становить, в середньому, 1920 кг, 2697 кг та 3657 кг, відповідно.

Враховуючи характер отриманих залежностей, попередньо можна стверджувати, що при необхідності збільшення максимальної товщини, або ширини розрізуваного плоского металопрокату металоємність проєктованих ножиць може бути, за необхідності, пропорційно збільшена, або зменшена відносно початкової.

На наступному етапі виконувалось математичне моделювання досліджуваної розділової операції для випадків використання шевронних ножів з кутом α нахилу прямолінійних площин $1,2^\circ$, 2° та 3° з варіюванням значень межі міцності розрізуваного матеріалу, яка також, має суттєвий вплив на енергосилові показники розділової операції і, як наслідок, металоємність проєктованих ножиць. На рис. 3 представлені, отримані за результатами моделювання, залежності металоємності проєктованих ножиць від межі міцності розрізуваного матеріалу. Ці залежності отримані при моделюванні процесу розрізання плоского металопрокату товщиною 25 мм та шириною 2000 мм шевронними ножами з кутом нахилу прямолінійних площин $1,2^\circ$, 2° та 3° .

Представлені залежності також прямі та наближені до лінійних, при цьому, очікувано,

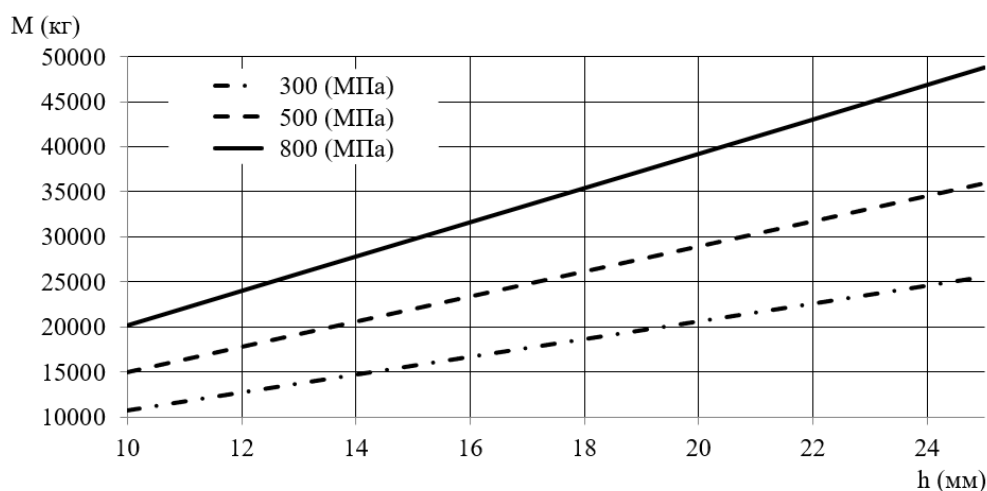


Рис. 1. Залежності маси M проєктованих ножиць від максимальної товщини h розрізуваного плоского металопрокату, отримані для трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа)

варіювання межі міцності розрізуваного металопрокату в діапазоні 300...800 МПа, призводить до приросту маси необхідних ножиць, який, для кожного модельованого значення кута α , становить, відповідно, в середньому, 2497 кг, 1689 кг та 1389 кг, на кожні додаткові 10% від початкової максимальної межі міцності розрізуваного плоского металопрокату.

В той же час слід відзначити наявну неоднорідність приросту показників металоємності ножиць при зменшенні кута нахилу прямолінійних площин шевронного ножа. Зокрема у проміжку між 1° та 2° спостерігається більш суттєве зростання металоємності ножиць ніж у проміжку між 2° та 3° , що може бути корисним враховувати як при проектуванні нових ножиць, так і при коригуванні

наявних техніко комерційних пропозицій. Тому на останньому етапі дослідження було виконане моделювання процесу розрізання плоского металопрокату товщиною 25 мм та шириною 2000 мм з трьох зазначених умовних марок сталі з варіюванням кута нахилу прямолінійних площин шевронного ножа в межах $1,2^\circ \dots 3^\circ$. Отримані, при моделюванні залежності представлені на рис. 4.

Представлені на рисунку 4 залежності мають зворотний нелінійний характер. При цьому зі зменшенням значення кута α у заданому діапазоні, збільшення металоємності ножиць відбувається з різною інтенсивністю, з явним переходом при значенні кута $2,1^\circ \dots 2,2^\circ$, що доцільно враховувати при визначенні оптимальних параметрів процесу поперечного розрізання плоского мета-

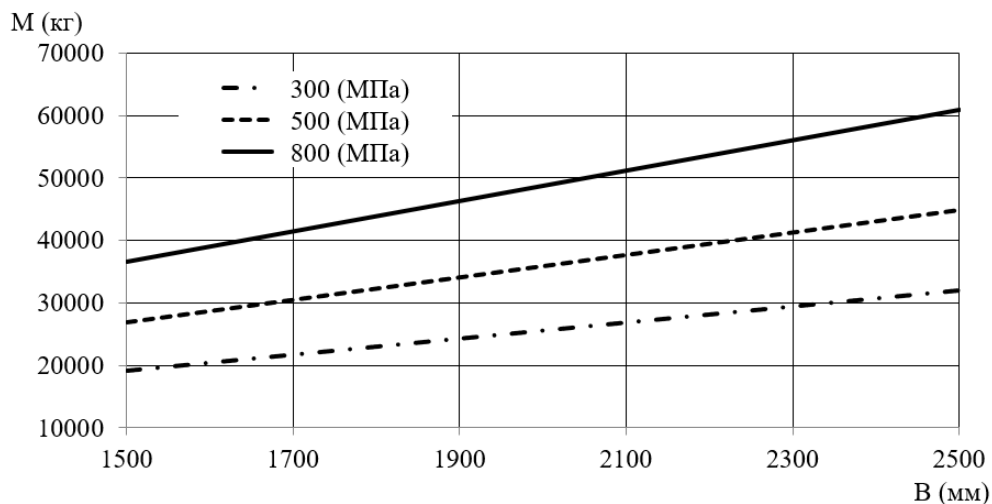


Рис. 2. Залежності маси M проєктованих ножиць від максимальної ширини B розрізуваного плоского металопрокату, отримані для трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа)

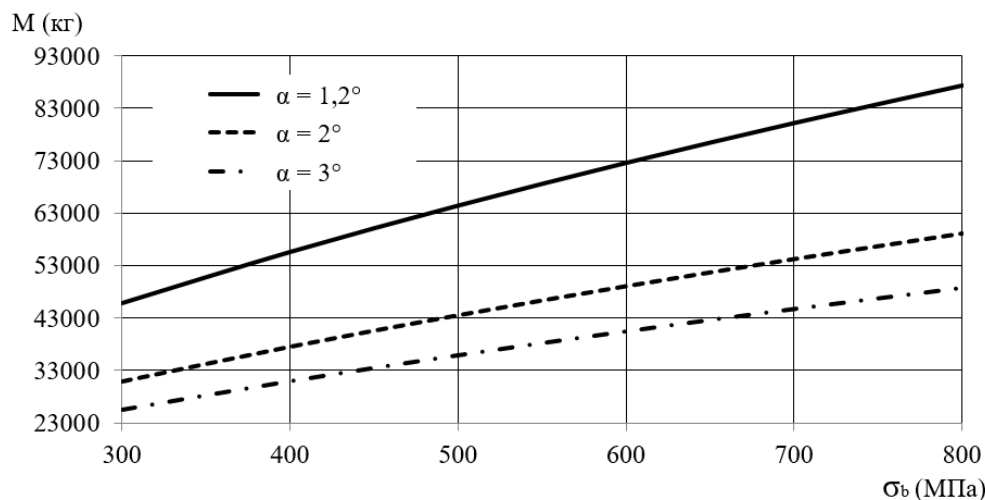


Рис. 3. Залежності маси M проєктованих ножиць від межі міцності σ_b розрізуваного плоского металопрокату, отримані для трьох значень кута α нахилу прямолінійних площин шевронного ножа $1,2^\circ$, 2° та 3°

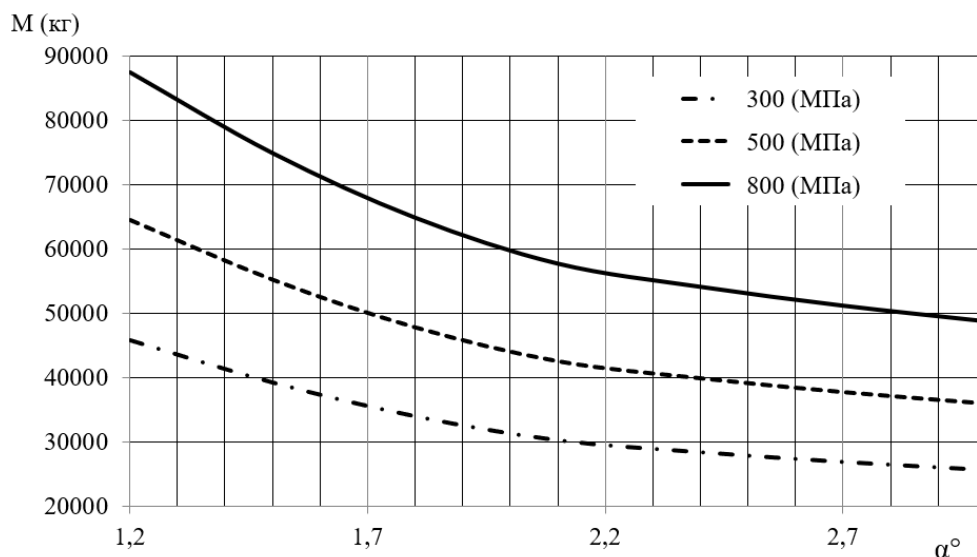


Рис. 4. Залежності маси M проєктованих ножиць від кута α нахилу прямокутних площин шевронного ножа, отримані для трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа)

лопрокату класичним шевронним ножом, з забезпеченням необхідних показників якості готової металопродукції.

Загалом, у модельованому діапазоні, збільшення зазначеного кута на $2,8^\circ$ привело до зменшення металоємності проєктованих ножиць в середньому на 44% для усіх трьох модельованих умовних марок сталі (при незмінних інших технологічних параметрах розділової операції), однак, слід враховувати, що збільшення кута нахилу прямокутних площин шевронного ножа, потенційно, призводить до збільшення дефекту у вигляді залишкової деформації частини плоского металопрокату, яка у процесі розрізання знаходиться під шевронним ножом. Наявність такого дефекту суттєво впливає на якість готової продукції та її товарний вигляд [2, 7, 8, 10]. Таким чином, значення кута нахилу прямокутних площин шевронного ножа також має суттєвий вплив на металоємність проєктованих ножиць. При цьому характер цього впливу є неоднорідним, що необхідно враховувати при визначенні оптимальних технологічних параметрів реалізації процесу поперечного розрізання плоского металопрокату шевронним ножом.

На підставі проведеного теоретичного дослідження впливу технологічних параметрів розділової операції на металоємність ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату шевронним ножом, можна стверджувати, що максимальна товщина, ширина та межа міцності розрізуваного плоского металопрокату, а також кут нахилу прямокутних площин застосовуваного шевронного ножа є вагомими факторами, що впливають на металоємність проєктованих ножиць. При цьому характер впливу зазначених факторів досить

суттєво відрізняється, що треба враховувати при висуненні та впровадженні пропозицій щодо виготовлення та поставки обладнання ліній розрізання плоского металопрокату. На практиці потрібна комплексна оцінка впливу цих технологічних параметрів як на металоємність проєктованих ножиць, так і на якість готової продукції.

Висновки. Ножиці для поперечного розрізання плоского металопрокату шевронним ножом становлять значну частину номенклатури обладнання, яке випускається машинобудівними виробництвами для оснащення ліній розрізання сучасних прокатних станів. При цьому на етапі обробки замовлення на поставку таких ножиць необхідно мати можливість попереднього визначення їх металоємності, яка залежить від комплексу факторів, основними з яких є технологічні умови реалізації розділового процесу.

За результатами проведеного теоретичного дослідження встановлено, що товщина, ширина та межа міцності розрізуваного плоского металопрокату, а також кут нахилу прямокутних площин застосовуваного шевронного ножа різною мірою впливають на металоємність проєктованих ножиць. Зокрема, у модельованих діапазонах варіювання зазначених параметрів, найбільш суттєвий вплив на металоємність ножиць має ширина розрізуваного плоского металопрокату, що є очікуваним, оскільки вона безпосередньо зумовлює ширину металоконструкції проєктованих ножиць.

Також значний вплив на металоємність ножиць має кут нахилу прямокутних площин шевронного ножа та товщина розрізуваного металопрокату, адже ці параметри визначають геометрію осередку розрізання, тому безпосередньо впливають на енергосилові показники розділової операції. При цьому

залежність металоємності ножиць від зазначеного кута є нелінійною з явною зміною інтенсивності. Це доцільно враховувати при розробці оптимальних техніко-комерційних пропозицій на виготовлення та поставку ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату шевронним ножом з урахуванням їх собівартості та якості готової продукції.

Результати виконаного дослідження можуть бути в подальшому використані при розробці, тестуванні та впровадженні програмного забезпечення для автоматизованого проєктування технології та обладнання процесу поперечного розрізання плоского металопрокату на ножицях з шевронним ножом.

Список літератури:

1. Mori K. Review of Shearing Processes of High Strength Steel Sheets. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2020. Т. 4, №2. С. 54. <https://doi.org/10.3390/jmmp4020054>.
2. Боровік П. В. Розвиток теоретичних основ та вдосконалення технології і обладнання процесів операцій розділення в прокатному виробництві: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.03.05. Краматорськ, 2021. 428 с.
3. A particle finite element method approach to model shear cutting of high-strength steel sheets / O. Sandin та ін. *Computational Particle Mechanics*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00708-5>
4. Іщенко А., Капустін С. Аналіз способів розкрою заготовок в лініях прокатних станів. *Наука та виробництво*. 2023. №25. С. 20–26. <https://doi.org/10.31498/2522-9990252023286596>
5. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A. E. Gvozdev та ін. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8, №1. С. 148–152. <https://doi.org/10.1134/s2075113317010178>
6. Gustafsson, E., Karlsson, L., Oldenburg, M. Experimental study of forces and energies during shearing of steel sheet with angled tools. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2016. № 11. С. 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40712-016-0063-1>
7. Селезньов М. Є., Боровік П. В. Залежність металоємності ножиць від технологічних параметрів процесу розрізання плоского металопрокату. *Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"*. 2024. №2(1). С. 133–144. <https://doi.org/10.62911/ete.2024.02.01.11>
8. Селезньов М. Є. Удосконалення технології та обладнання процесів різання товстолистового металопрокату на ножицях: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05. Краматорськ, 2016. 206 с.
9. Гречаний О. М. Обґрунтування вибору технічних параметрів гільйотинних ножиць прокатного стану. *Металургія*. 2017. Вип. 2(38). С. 126–130.
10. Borovik P. V., Seleznyov M. E. Influence of a chevron type knife design on the quality of sheet material shearing. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. №5. С. 218–223.

Seleznev M.Ye., Borovik P.V. ANALYSIS OF SEPARATION PROCESS PARAMETERS INFLUENCE ON THE METAL CAPACITY OF SHEARS WITH A CHEVRON KNIFE

Based on the mathematical modeling results, the influence analysis of the main technological parameters of cross-cutting flat rolled metal process on the metal capacity of the designed shears with a chevron knife was described in the article.

Specifically, the impact of maximum thickness, width, and strength limit of the shearing flat rolled metal, as well as the inclination angle of the straight planes of the chevron knife's shearing edge, were shown. Mathematical modeling process of shearing was carried out by varying these technological parameters within ranges relevant to the development of new shears and improvement of existing shears with a chevron knife. Based on the modeling results, the dependences of the designed shears' mass on these technological parameters of the operation shearing were obtained, and the parameter's influence was assessed. Within the modeled ranges, the width of the shearing flat sheet metal had the most significant impact on the shears' metal consumption, which is expected, as it directly determines the width of the metal structure of the designed shears. Additionally, it was found that the inclination angle of the chevron knife's shearing edge also significantly affects the shears' metal consumption, with a nonlinear inverse relationship between the shears' mass and this parameter, displaying noticeable intensity changes within the modeled range. Thus, for making and implementing proposals of the shears production with a chevron knife for shearing flat sheet metal a comprehensive assessment of these technological parameters' impact on both: the designed shears metal consumption and the quality of the finished product are necessary. The research results can be further used in the development, testing, and implementation of software for automated design of the technology and equipment for the transverse shearing process of flat rolled metal with chevron knife shears.

Key words: shears, shearing, flat rolled metal, technological parameters, metal capacity, mathematical modeling.

Дата надходження статті: 24.11.2025

Дата прийняття статті: 12.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.735.45:338.45

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/05>

Царенко А.О.

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

Тягній В.Г.

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

Головенський В.В.

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

Кириченко О.П.

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

ПЛАНЕР І ТРАНСМІСІЯ ЯК КЛЮЧОВІ ЕЛЕМЕНТИ НАДІЙНОСТІ ТА ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ ВЕРТОЛІТНИХ СИСТЕМ

У статті показано, що сучасне вертолітобудування функціонує в умовах суперечливих вимог: з одного боку, зростаюча глобальна конкуренція та інтенсифікація експлуатаційних навантажень, а з іншого – необхідність підвищення надійності, економічної ефективності та інвестиційної привабливості. Глобальний ринок вертольотів демонструє стале зростання, що відкриває нові можливості для українського авіабудування, зокрема через модернізацію парку Мі-8/17. Метою дослідження є розробка моделі, що поєднує застосування сучасних матеріалів для планера (CFRP, GLARE, Al-Li, Ti/CFRP), еволюцію трансмісійних систем (від планетарних до гібридних і магнітних) та впровадження цифрових інструментів проактивного обслуговування (FEA, HUMS, ML). Центральним елементом роботи є інтегрована модель $Rint(P,T;ROI)$, яка встановлює зв'язок між технічними параметрами (MTBF, інтенсивність відмов) і фінансовими метриками (LCC, NPV, ROI) у рамках концепції обслуговування за технічним станом (CBM) та інвестування протягом життєвого циклу (LCI). Проведений аналіз демонструє, що гібридна архітектура матеріалів планера (Al-Li + GLARE + CFRP) забезпечує синергетичний ефект: зменшення маси на $\approx 25\%$, скорочення LCC на 28% і підвищення ROI до $180\text{--}220\%$ протягом 10 років. Технологія адитивного відновлення LENS розглядається як засіб зменшення витрат на ремонт на $50\text{--}70\%$ і подовження ресурсу деталей. Економічне моделювання підтверджує високу ефективність запропонованого підходу: подвоєння MTBF з 500 до 1000 год веде до зниження LCC удвічі та зростання ROI до 120% , а досягнення MTBF 2000 год забезпечує $ROI \approx 360\%$ з терміном окупності 3–4 роки. У стратегічному плані реалізація запропонованих заходів сприятиме формуванню в Україні власного технологічного кластеру, збільшенню експортного потенціалу до $1,2\text{--}1,5\ \$$ і зростанню частки на світовому ринку до $5\text{--}7\%$. Для досягнення цих цілей сформовано практичні рекомендації щодо локалізації виробництва композитів, створення центрів компетенцій з HUMS та LENS, а також гармонізації національної нормативної бази з вимогами EASA та FAA.

Ключові слова: вертольотні системи, планер, трансмісія, надійність, інвестиційна привабливість, композитні матеріали, адитивне виробництво, гібридна трансмісія, магнітна передача, цифровий двійник, модернізація Мі-8/17.

© Царенко А.О., Тягній В.Г., Головенський В.В., Кириченко О.П., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Сучасні вертолітні системи функціонують у контексті суперечливих вимог: з одного боку – зростаюча глобальна конкуренція та інтенсифікація експлуатаційних навантажень, з іншого – потреба у підвищенні надійності, економічної ефективності та інвестиційної привабливості. Глобальний ринок вертольотів демонструє стаке зростання (CAGR $\approx$ 4,6–4,8 % до 2030 р.), що створює нові можливості для українського авіабудування, зокрема через модернізацію парку Mi-8/17 і розвиток суміжних виробничих компетенцій. Водночас традиційні конструктивні рішення і матеріали дедалі частіше виявляють свою технологічну обмеженість, що призводить до низького рівня напрацювання на відмову (MTBF < 500 год), високих витрат життєвого циклу (LCC > 4,5 млн \$/1000 год) та недостатньої рентабельності інвестицій (ROI < 80 %) в умовах інтенсивної експлуатації. Найвищу частку відмов формують системи планера ($\approx$ 35 %) і трансмісії ($\approx$ 28 %), що визначає потребу у пошуку нових матеріальних, конструктивних і технологічних рішень.

У статті запропоновано інтегрований підхід, який поєднує технічну оптимізацію з економічним обґрунтуванням інвестицій. Розглянуто сучасні матеріали для планера, зокрема композити типу CFRP та GLARE; проаналізовано еволюцію трансмісійних систем – від класичних планетарних до гібридних і магнітних; побудовано інтегровані моделі надійності та економічної ефективності, що встановлюють зв'язки між технічними параметрами (MTBF, інтенсивність відмов) і фінансовими метриками (LCC, ROI). Окрему увагу приділено застосуванню цифрових технологій прогнозування і моніторингу стану систем (FEA, HUMS, ML) для підвищення експлуатаційної готовності. У підсумку подано економічну оцінку інвестиційної привабливості модернізації та стратегічні рекомендації для розвитку національного виробництва і гармонізації регуляторного середовища, що потенційно може забезпечити зростання експортного потенціалу України до 1,2–1,5 млрд дол. США і підвищення її частки у світовому ринку вертолітної техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика підвищення надійності планера та трансмісії вертольотів як ключових чинників експлуатаційної готовності, економічної ефективності та інвестиційної привабливості посідає важливе місце у сучасному науковому дискурсі. Останні дослідження концентруються на напрямках інтегрованого моделювання надійності компонентів, ана-

лізу експлуатаційних даних, оптимізації інтервалів капітального ремонту (Hard Time limits), застосуванні індикаторів MTBF/MTTF у системах логістичного забезпечення, впровадженні композитних матеріалів і волокнисто-металевих ламінатів (FML) у конструкціях планера, розвитку методів неруйнівного контролю (NDT), а також створенні статистичних і імітаційних моделей технічної експлуатації для вертольотів типу Mi-8/17.

Ґрунтовний внесок у формування методологічної бази здійснили Г.С. Ламсон, Ш.К. Гайкванд і Дж. Лі [1], які розробили інтегровану процедуру моделювання надійності компонентів вертольотів на основі аналізу швидкості вилучень, середнього часу між відмовами (MTBF) і розподілів за Вейбуллом. На емпіричних даних редуктора Bell 412 (C-box) доведено, що рекомендований виробником інтервал обслуговування НТ = 4000 год є надмірно консервативним: реальний MTBUR становить 5162,5 год, а продовження НТ до 4500 год збільшує ризик відмови лише на 5 %. Отримані результати стали підґрунтям для оптимізації інтервалів ТО, зниження вартості технічного обслуговування та підвищення безпеки польотів.

А. Жилук, М. Зіся, Н. Гжесік і співавтори [2] запропонували впровадження показника Mean Time to Failure (MTTF) як базового індикатора контролю логістичного забезпечення експлуатації вертольотів. На прикладі парку Mi-8/Mi-17 розроблено математичну модель прогнозування MTTF критичних компонентів (планера, трансмісії, авіоніки) з інтеграцією у систему планування запасних частин. Використання цього підходу дало змогу підвищити точність прогнозування потреб у запасах до 95 %, скоротити час простоїв на 25–30 % і знизити логістичні витрати на 18–22 %, що підтверджує ефективність переходу від фіксованих НТ-інтервалів до обслуговування за технічним станом (CBM).

Вагомі результати отримані у сфері матеріалознавства. Л. Сетлак, Р. Ковалік і Т. Люсяк [3] довели, що заміна алюмінієвих сплавів у планерах вертольотів (AH-64 Apache, UH-60 Black Hawk, Eurocopter Tiger) на CFRP-композити зменшує масу конструкції на 20–35 %, підвищує ударну стійкість на 40–60 % і подовжує ресурс планера на 25–30 %. Водночас це скорочує витрати життєвого циклу (LCC) на 15–25 % завдяки кращій ремонтпридатності та простішому NDI-контролю. Автори наголошують на важливості локалізації виробництва препрегів і адаптації технологій до умов обмеженого імпорту – критичний аспект для розвитку українського авіабудування.

Комплексний огляд механічних характеристик волокнисто-металевих ламінатів (FML) подали Х.Е. Етрі, М.Е. Коркмаз і М.К. Гупта [4]. Дослідження показало, що матеріали типу GLARE забезпечують міцність на розтяг до 1200 МПа, втомну довговічність у 1,5–2 рази вищу за алюмінієві аналоги та зниження маси на 15–25 % при CAPEX + 10–20 %. Титанові ламінати Ti/CFRP демонструють підвищену термостійкість (до 300 °C) і корозійну стійкість, що робить їх перспективними для модернізації планерів вертольотів за критеріями LCC – 20–30 %.

Б. Ванг, Ш. Чжун і Т.Л. Лі [5] систематизували вісім основних методів неруйнівного контролю (NDT) композитних структур – від акустичної емісії (AE) до терагерцового (THz) контролю. Комбінування методів (наприклад, IRT + DIC) підвищує точність діагностики деламінацій на 30–50 % і знижує експлуатаційні витрати (OPEX) на 20–25 %. Автори акцентують увагу на інтеграції NDT-систем із HUMS і алгоритмами машинного навчання для прогнозування пошкоджень і підвищення MTBF-композитних планерів.

Серед українських робіт виокремлюються дослідження А. Бологіна, Ю. Мануліна та Г. Горохова [6], які запропонували статистичну модель оцінки стратегій технічної експлуатації планера військово-транспортних вертольотів із застосуванням напівмарківських процесів. Модель порівнює три стратегії (фіксовану, за технічним станом I та II типу) й демонструє, що стратегія ТСII підвищує коефіцієнт справності на 8–12 % і знижує витрати на 15–20 % порівняно з класичною, забезпечуючи перехід до CBM і зростання ROI.

А. Дмитрієв, О. Леонтьєв та А. Хижняк [7] розробили модель оцінювання надійності комплексу авіаційного озброєння (КАО) бойових вертольотів, використовуючи інтегральний коефіцієнт готовності K_g , що поєднує MTBF, MTTR та логістичні затримки. Зростання K_g на 10 % підвищує бойову ефективність на 7–12 %, що підкреслює взаємозв'язок між надійністю систем озброєння, планера та трансмісії.

У сфері цивільної експлуатації С. Бойко, О. Котов і С. Іщенко [8] проаналізували розвиток малої авіації в Україні, зокрема створення інфраструктури вертолітних майданчиків і технічних баз. Автори запропонували систему моніторингу показників MTBF і MTTF для прогнозування придатності, що дозволяє підвищити K_g на 10–15 % і знизити LCC на 12–18 %.

Отже, наукова література охоплює широкий спектр аспектів – від моделювання надійності

окремих компонентів до застосування інтелектуальних систем моніторингу. Водночас відсутня цілісна техніко-економічна модель, яка б інтегрувала аналіз MTBF/MTTF, LCC та ROI із сучасними матеріалами планера (CFRP, GLARE), еволюцією трансмісійних систем (гібридних, магнітних), цифровими інструментами прогнозування (FEA, HUMS, ML, NDT), імітаційним моделюванням стратегій ТО та економічною оцінкою інвестиційної привабливості. Усунення цієї наукової прогалини зумовлює актуальність розроблення авторської інтегрованої моделі, орієнтованої на підвищення MTBF на 40 %, зниження LCC на 28 % та зростання ROI на 150–220 % з фокусом на модернізацію та експортний потенціал українського авіабудування.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення інтегрованої техніко-економічної моделі підвищення надійності планера та трансмісії вертольотів типу Mi-8/17 на основі концепції Condition-Based Maintenance, що поєднує застосування сучасних композитних матеріалів, цифрових інструментів прогнозування технічного стану, імітаційного моделювання стратегій технічного обслуговування та розвиток регіональної авіаційної інфраструктури. Модель орієнтована на забезпечення зростання експортного потенціалу українського авіабудування шляхом підвищення експлуатаційної готовності, скорочення вартості життєвого циклу та збільшення рентабельності інвестицій.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати сучасні виклики забезпечення надійності планера та трансмісії вертольотів у контексті старіючого парку Mi-8/17, зокрема питання оптимізації Hard-Time-інтервалів і переходу до обслуговування за технічним станом (CBM) на основі показників MTBF/MTTF;

- розробити статистичну модель оцінювання стратегій технічного обслуговування з використанням імітаційного моделювання напівмарківських процесів для визначення оптимальної структури ТО за критеріями технічної готовності, вартості та ефективності використання;

- ідентифікувати інтегральні показники надійності комплексу авіаційного озброєння (КАО) та оцінити їхній вплив на бойову ефективність вертольотів типу Mi-24/Mi-35 з урахуванням логістичних затримок;

- обґрунтувати напрями розвитку регіональної інфраструктури експлуатації вертольотів – мережі вертолітних майданчиків і авіаційно-технічних баз – з урахуванням гармонізації

нормативних вимог ICAO та EASA, спрямованих на підвищення привабливості малої авіації для пасажирських і вантажних перевезень;

– сформулювати практичні рекомендації для ключових стейкхолдерів щодо впровадження інтегрованої моделі, локалізації виробництва композитних матеріалів і технологій, а також оцінити очікуваний економічний ефект і вплив на експортно-виробничу динаміку авіаційного сектору України.

Виклад основного матеріалу. Сучасний етап розвитку вертольотобудування характеризується інтенсивним упровадженням нових матеріалів і конструктивних рішень, покликаних забезпечити оптимальне співвідношення маси, міцності, втомної довговічності та вартості життєвого циклу (LCC) планера. Традиційні алюмінієві сплави (2024-T3, 7075-T6) поступово замінюються перспективними альтернативами – алюмінієво-літєвими (Al-Li), вуглецевими полімерними (CFRP), волокнисто-металевими (FML, зокрема GLARE) та титано-композитними (Ti/CFRP) матеріалами. Вибір матеріалу істотно впливає на показники надійності, ремонтпридатності та економічної ефективності експлуатації вертольотів типу Мі-8/17. Сертифікаційні вимоги до композитних конструкцій регламентуються документом FAA AC 20-107B, який визначає критерії льотної придатності, пошкодженостійкості та процедур неруйнівного контролю (NDI) для частин 23, 25, 27 і 29 Повітряних правил США [9].

Алюмінієво-літєві сплави (Al-Li) третього покоління (2198-T8, 2060-T8E30) забезпечують зниження густини на $\approx 8\%$ і підвищення корозійної стійкості порівняно з традиційними Al-сплавами серій 2XXX/7XXX. Межа міцності становить 500–600 МПа, втомна межа – 200–300 МПа при 10^7 циклів [10, 11]. Зменшення маси планера на 10–15 % підвищує корисне навантаження або дальність польоту на 5–8 %, хоча потребує спеціалізованих технологій зварювання (FSW) і збільшує CAPEX на 15–25 %.

Вуглецево-пластикові композити (CFRP) (T800/3900-2B) демонструють виняткову питому міцність – 2500–3000 МПа при щільності 1,5–1,6 г/см³ та модулі пружності 150–180 ГПа.

Втомна міцність ($R = 0,1$) сягає 800–1200 МПа (10^6 циклів), що перевищує алюмінієві сплави на 40–60 %. Використання CFRP у планері Мі-8/17 (лопаті, панелі фюзеляжу) зменшує масу на 20–35 %, подовжує ресурс на 20–50 % та скорочує LCC на 20–30 % завдяки відсутності корозії й спрощенню процедур NDI. Основні обмеження – чутливість

до ударів (30–60 Дж/см²) і висока вартість препрегів (100–200 USD/кг). Відповідно до FAA AC 20-107B, композитні конструкції мають проходити оцінку damage tolerance, включно з аналізом деламінацій і вологи.

Волокнисто-металеві ламінати (GLARE) (Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy) поєднують алюмінієві шари (0,3–0,5 мм) зі скловолоком в епоксидній матриці. GLARE 3/2 характеризується міцністю на розтяг 800–1200 МПа, втомною межею 300–400 МПа (10^7 циклів) та ударною в'язкістю 100–150 Дж/см² [12]. Маса зменшується на 15–25 %, ресурс подовжується на 50–100 %, а LCC скорочується на 20–30 % завдяки можливості локального ремонту без демонтажу. Зростання CAPEX на 10–20 % окупається протягом 5–7 років експлуатації. Матеріал успішно застосовується у фюзеляжах Airbus A380 та має потенціал використання в планерах вертольотів через високу втомну та пошкодженостійкість.

Титано-композитні гібриди (Ti/CFRP) поєднують шари титану (Ti-6Al-4V) і CFRP для зон із підвищеним термічним навантаженням (до 300 °C). Їхня міцність становить 1500–2000 МПа, втомна довговічність – до 10^8 циклів, а корозійна стійкість у 5–7 разів вища за алюміній. Попри зниження маси на 20–30 %, вартість виробництва у 2–3 рази перевищує GLARE, тому застосування доцільне переважно у силових вузлах трансмісії та гарячих зонах планера.

Аналіз даних табл. 1 підтверджує виражену нелінійність техніко-економічного компромісу: максимальне зниження маси та приріст MTBF (до 100 % у Ti/CFRP) супроводжуються експоненційним зростанням вартості виробництва (до 6 разів).

Оптимальна зона економічної доцільності спостерігається для матеріалів GLARE та Al-Li, які забезпечують приріст MTBF на 50–80 % при помірному зростанні CAPEX (1,3–2,0) та скороченні LCC до 30 %. CFRP, попри найвищу питому жорсткість, характеризується підвищеною чутливістю до динамічних навантажень, що вимагає додаткових шарів захисту та підвищує OPEX на 10–15 % у реальних умовах експлуатації Мі-8/17. Титано-композитні гібриди (Ti/CFRP) є доцільними для локальних силових вузлів (до 15 % поверхні планера), де термічна стійкість має вирішальне значення.

Застосування гібридної архітектури (Al-Li+GLARE + CFRP) забезпечує синергетичний ефект – зменшення маси планера на $\approx 25\%$, скорочення LCC на 28 % і підвищення ROI до 180–220 % протягом 10 років експлуатації. Такий підхід є технологічно та економічно виправданим для модернізації

Порівняльна оцінка техніко-економічних показників матеріалів планера вертольотів

Показник / Матеріал	Традиційний Al (2024-T3)	Al-Li (3-є покоління)	CFRP (T800)	GLARE 3/2	Ti/CFRP
Щільність, г/см ³	2,78	2,55–2,65	1,55–1,60	2,35–2,45	2,10–2,30
Питомий модуль пружності, ГПа·см ³ /г	26	29–31	95–115	28–30	55–70
Втомна межа (10 ⁷ циклів), МПа	120–150	200–280	600–900	300–400	500–700
Ударна в'язкість, Дж/см ²	20–30	25–40	30–60	100–150	80–120
Зниження маси планера, %	–	8–12	25–35	15–25	20–30
Приріст MTBF, %	–	15–25	40–60	50–80	60–100
Зміна LCC, %	–	–10...–15	–20...–30	–20...–30	–15...–25
Відносна вартість виробництва	1,0	1,3–1,5	3,0–5,0	1,5–2,0	4,0–6,0

Джерело: складено автором на основі [9–12]

планера вертольотів типу Mi-8/17, поєднуючи високу пошкодженостійкість (GLARE) з питомою міцністю (CFRP) і ремонтпридатністю (Al-Li). Трансмійні системи вертольотів є ключовим елементом, що забезпечує передачу потужності від двигунів до несучого та хвостового гвинтів, компенсуючи високі крутні моменти (до 10–15 кН·м для Mi-8/17) та динамічні навантаження під час інтенсивної експлуатації. Еволюція цих систем демонструє поступовий перехід від класичних механічних конструкцій до гібридно-магнітних конфігурацій, спрямованих на підвищення надійності (MTBF > 2000 год), зниження маси, рівня шуму та енерговитрат, а також поліпшення експлуатаційної готовності.

Планетарна схема традиційно є базовою для вертольотів типу Mi-8/17, Bell 412, UH-60 Black Hawk. Вона складається з центрального сонячного шестерня, сателітів і епіциклічного колеса, забезпечуючи компактність і високий коефіцієнт редукції (1:20–1:30) при потужності 4–7 МВт. Конструкційні матеріали (18X2H4BA, AISI 9310) характеризуються високою контактною міцністю та низькою втомною чутливістю.

Типовий MTBF становить 1500–2500 год, ККД 95–97 %. Недоліками залишаються зношування зубців (пінтинг, сколінг) і втрати на тертя, які зумовлюють ≈ 28 % відмов у загальному балансі несправностей трансмісії. Співвісні протидіючі планетарні редуктори (coaxial counter-rotating), що використовуються у вертольотах Sikorsky X2 і Ка-52, зменшують рівень вібрацій на 40–60 % і підвищують ККД на 1–2 % завдяки компенсації реактивного моменту [13].

Дослідження нелінійної динаміки підтверджують, що зміна жорсткості зачеплення та зазори (back lash) викликають хаотичні коливання при високих

обертах, що вимагає оптимізації профілю зубців, використання демпферів і систем моніторингу стану (HUMS). Магнітні передачі (magnetic gearboxes) ґрунтуються на безконтактній передачі крутного моменту між роторами через взаємодію постійних магнітів (NdFeB, SmCo) і феромагнітного модулятора. Вони усувають механічний контакт, тим самим знижують тертя, шум і потребу в мастилі. Прототипи компаній Magnomatics та Rolls-Royce демонструють можливість передавання моменту до 5–10 кН·м з редукцією 1:10–1:50 і ККД до 98–99 % [14].

Основні переваги – відсутність зносу, висока стійкість до перевантажень (прослизання при > 150 % номіналу) та суттєве зменшення маси (–20–30 %). Серед обмежень – температурна чутливість (вище 120 °C спостерігається зниження магнітної індукції на 20–30 %), складність масштабування до потужностей важких вертольотів і висока собівартість матеріалів (CAPEX +200–300 %). Наразі такі рішення перебувають на стадії R&D (NASA Glenn Research Center, 2023) і мають перспективу для середніх гібридних платформ.

Гібридні системи поєднують механічну частину планетарного типу з магнітною муфтою або електромотором, формуючи електромеханічну трансмісію. Концепції Siemens eFusion та NASA X-57 демонструють можливість рекуперації 15–20 % енергії під час зниження потужності та варіативного керування моментом [15]. Такі системи забезпечують ККД 97–98 %, зменшення маси на 15–25 % та MTBF > 3000 год, водночас вимагаючи високого рівня електромагнітного захисту й інтеграції з енергомодулями (батареї, суперконденсатори). Для вертольотів Mi-8/17 гібридизація розглядається як модульна модернізація із поступовим переходом до електропідсиленої трансмісії.

Таблиця 2

Порівняльна оцінка трансмісійних систем вертольотів

Показник / Тип трансмісії	Планетарна	Магнітна	Гібридна
ККД, %	95–97	98–99	97–98
MTBF, год	1500–2500	~5000 (R&D)	3000–3500
Зниження маси, %	–	20–30	15–25
Вібрації, g	0,5–2 (0,2* для coaxial)	< 0,1	0,2–0,5
Шум, дБ	90–100	< 70	75–85
Зміна LCC, %	–	–15...–25	–20...–30
Відносний CAPEX	1,0	3,0–4,0	2,5–3,5

* для співосних протидіючих схем.

Джерело: складено автором на основі [13–18]

Аналіз табл. 2 свідчить, що магнітні та гібридні системи потенційно здатні знизити LCC на 20–30 % і підвищити ROI на 120–180 % у середньостроковій перспективі, однак потребують масштабування технологій і випробувань для важких вертольотів. Оптимальним напрямом модернізації Мі-8/17 є гібридна архітектура з елементами співвісних планетарних редукторів і магнітного демпфування, яка поєднує переваги перевірених механічних рішень із новими енергетичними технологіями.

Для забезпечення системного підходу до оцінювання ефективності модернізації планера та трансмісій вертольотів типу Мі-8/17 запропоновано інтегровану техніко-економічну модель

$$Rint(P, T; ROI), \quad (1)$$

що поєднує технічні параметри P (показники надійності – $MTBF$, інтенсивність відмов λ) і технологічні характеристики T (матеріали, системи контролю) із фінансовими метриками ROI (рентабельність інвестицій). Модель базується на принципах Condition-Based Maintenance (CBM) та Life Cycle Investment (LCI), що забезпечує інтеграцію технічної та економічної ефективності модернізації [19–22].

Інтегральна надійність визначається як:

$$Rint = f\left(\frac{MTBF(T)}{\lambda_{adj}(P)}, \frac{NPV}{CAPEX}\right) \rightarrow max, \quad (2)$$

де $MTBF(T)$ – середній час безвідмовної роботи, що залежить від конструкційних матеріалів (CFRP, GLARE, Ti-композити); $\lambda_{adj}(P)$ – скоригована інтенсивність відмов; $NPV/CAPEX$ – відносна ефективність інвестицій.

Оптимізація здійснюється за критерієм максимізації ROI при обмеженнях на LCC. Такий підхід відображає концепцію Life Cycle Investment, де розглядається не лише собівартість, а й капіталізаційна віддача модернізаційних рішень протягом життєвого циклу виробу [19].

Скоригована інтенсивність відмов визначається залежно від умов експлуатації:

$$\lambda_{adj} = \lambda_0 \diamond k_{env} \diamond k_{load} (1 - k_{HUMS}), \quad (3)$$

де λ_0 – базове значення з довідкових або статистичних даних; k_{env} – вплив середовища (температура, пил, волога); k_{load} – навантажувальний коефіцієнт; k_{HUMS} – корекція завдяки системам моніторингу (HUMS, ML-аналітика).

Застосування HUMS дозволяє зменшити λ_{adj} на 15–30 % і підвищити MTBF до 50–800 %, що підтверджується дослідженнями експлуатації МН-60S і СН-47 [21, 22]. Для подальшого моделювання використовуються розподіли Weibull або експоненційні закони з калібруванням для конкретних умов експлуатації.

Життєвий цикл визначається рівнянням:

$$LCC = CAPEX + \sum_{t=1}^T \frac{OPEX_t + M_t \cdot \lambda_{adj} \cdot C_{ref}}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

де $CAPEX$ – капітальні вкладення, PEx_t – операційні витрати, M_t – час простою, C_{ref} – вартість відмови, r – ставка дисконту, T – період служби.

Підвищення MTBF на 1 % знижує LCC на 0,3–0,5 %, а впровадження CBM зменшує витрати на техобслуговування на 25–35 % [20, 22].

Додатково чиста приведена вартість обчислюється як

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} + RV, \quad (5)$$

де C_t – чисті потоки (враховуючи зменшення OPEX і простоїв), i – ставка дисконту (4–8 %), RV – залишкова вартість.

Моделі DOT&E показують, що подвоєння MTBF зменшує LCC на ≈ 60 %, забезпечуючи ROI до 5:1 у межах 5–8 років експлуатації [22].

Результати демонструють, що поєднання нових матеріалів (GLARE, CFRP), CBM-стратегій та гібридної трансмісії забезпечує зростання ROI у 2–3 рази та зниження LCC на ≈ 30 %, під-

Зв'язок ключових метрик при модернізації

Показник	Базовий (AI)	GLARE + CBM	Гібридна трансмісія + HUMS
MTBF, год	~500	700–900	1000–1500
$\lambda_a d_j$, год ⁻¹	0.002	0,001–0.0015	0,0007–0,001
LCC, млн \$/1000 год	4,5	3,2–3,5	2,8–3,2
NPV, млн \$	базовий	+30–50 %	+60–80 %
ROI, %	~80	150–200	180–250

Джерело: розраховано автором на основі [19–22]

тверджуючи ефективність інтегрованої моделі $R_{int}(P, T; ROI)$

Сучасні методи цифрового інжинірингу та обслуговування за технічним станом формують нову парадигму управління надійністю вертольотів. Скінчений елементний аналіз (FEA), системи моніторингу технічного стану (HUMS) і алгоритми машинного навчання (ML) дозволяють перейти від реактивного до проактивного технічного обслуговування, забезпечуючи прогнозування відмов і підвищення ефективності експлуатації. Застосування FEA у програмних середовищах типу ANSYS або Abaqus дає змогу моделювати напружено-деформований стан планера та трансмісії під динамічними навантаженнями й виявляти потенційно критичні зони пошкоджень, зокрема деламінацію в елементах із CFRP чи GLARE. HUMS-системи, інтегровані у вертольоти типу Mi-8/17 (Honeywell, Goodrich), збирають дані з сенсорів вібрації, температури й акустичної емісії, формуючи великі масиви даних для подальшого машинного аналізу. Алгоритми ML, зокрема LSTM-мережі та моделі Random Forest, обробляють часові ряди сигналів і виявляють аномалії за десятки годин до потенційної відмови, що дає змогу збільшити середній час безвідмовної роботи (MTBF) та скоротити простої техніки. Поєднання FEA, HUMS і ML створює цифрового двійника вертольота, який моделює сценарії екстремальних навантажень і оптимізує графіки технічного обслуговування. Внаслідок цього експлуатаційна готовність може перевищувати коефіцієнт $K_T = 0,95$, $K_{\{T\}} = 0$, $\{K_T = 0,95\}$, а непередбачені простої скорочуються на 30–35 % [23, 24].

Системи предиктивного обслуговування (PdM), що базуються на HUMS та ML, дають змогу реалізувати концепцію Condition-Based Maintenance (CBM), за якої технічне обслуговування виконується за фактичним станом агрегатів, а не за регламентними інтервалами. У трансмісії Mi-8/17 алгоритми PdM розпізнають ранні ознаки мікрозношування шестерень за характерними вібраційними спектрами, а в елементах планера – мікротріщини в композитній обшивці. У світо-

вій практиці впровадження PdM у флотах АН-64, AW139 та H225 зменшило експлуатаційні витрати (OPEX) на 20–35 % і забезпечило рентабельність інвестицій (ROI) понад 150 % протягом 3–5 років [25–27]. Для українського парку вертольотів інтеграція PdM з національними логістичними системами запасних частин може скоротити час простоїв на 25–30 % і зекономити до 0,5–0,8 млн USD на одиницю щороку.

Важливою складовою цифрової трансформації є впровадження адитивних технологій. Laser Engineered Net Shaping (LENS), що належить до спрямованих енергетичних процесів (DED), забезпечує високоточне відновлення пошкоджених деталей без демонтажу, зберігаючи металографічну цілісність матеріалу. Лазерне наплавлення порошкових сплавів (AISI 9310, Ti-6Al-4V, INCONEL 625) мінімізує тепловий вплив і дає змогу відновлювати складні деталі редукторів чи елементи обшивки. У міжнародній практиці (NATO STO, Optomec) технологія LENS використовується для ремонту лопатей турбін і редукторів, знижуючи витрати на 50–70 % порівняно з виготовленням нових компонентів [28–30]. Для модернізованих Mi-8/17 LENS може застосовуватися для відновлення шестерень головного редуктора та панелей фюзеляжу з GLARE, збільшуючи ресурс на 20–30 %. Локалізація таких технологій на базі НАУ чи «Мотор Січ» забезпечить автономність ремонтної інфраструктури та конкурентоспроможність на ринку MRO-послуг.

Економічний ефект від модернізації оцінюється через інтегровані моделі LCC та ROI. Для базового сценарію Mi-8/17 капітальні витрати становлять близько 2–3 млн USD, експлуатаційні – 4,5 млн USD на 1000 год польоту, а MTBF – приблизно 500 год. Застосування CFRP зменшує масу на 25–35 % і скорочує споживання пального на 15 %, тоді як впровадження LENS скорочує витрати на ремонт на 50–70 %, знижуючи LCC на 25–30 % і підвищуючи ROI до 200 % у десятирічному горизонті [31]. Адитивне виробництво в авіаційному секторі зростає на 15–20 % щорічно, що дає змогу змен-

шити імпорт авіадеталей в Україні на 40 % і додати 0,1–0,2 млрд USD до ВВП галузі [32].

Аналіз чутливості моделі показує нелінійну залежність ROI від MTBF і LCC: підвищення MTBF у два рази (з 500 до 1000 год) зменшує LCC удвічі – до 2,25 млн USD/1000 год – та підвищує ROI на 50 % до 120 %. Подвоєння MTBF до 2000 год забезпечує ROI ≈ 360 % і окупність інвестицій протягом 3–4 років [33, 34]. Чутливість моделі залишається високою: зміна MTBF на ± 10 % призводить до варіації ROI на 15–20 %, що підкреслює значення CBM-стратегій для стабілізації витрат.

Комплексна модернізація українського парку вертольотів із використанням композитних матеріалів, адитивних технологій і цифрових систем прогнозування формує нову економічну архітектуру галузі. За оцінками, потенційний експортний обсяг може досягти 1,2–1,5 млрд USD до 2030 р., збільшивши частку України на світовому ринку вертолітної техніки до 5–7 % [35]. Реалізація цих рішень створить 5000–7000 робочих місць, зменшить імпорт на 30 % і додасть 0,3–0,5 % до ВВП. Локалізація виробництва композитів на базі НАУ та ДП «Антонов» може задовольнити до 60 % внутрішніх потреб, тоді як створення центрів компетенцій у Києві та Запоріжжі з LENS, HUMS і NDT забезпечить сертифіковане відновлення деталей і щорічний сервісний дохід 100–150 млн USD. Гармонізація нормативної бази через спільні проекти EASA–SAAU та імплементацію CS-23/27 і FAA AC 20-107B скоротить термін сертифікації вдвічі (з 18 до 9 місяців) і підвищить експортну привабливість модернізованої техніки на 20–30 % [36, 37]. Цифрова інтеграція, адитивне виробництво й регуляторна гармонізація стають ключовими умовами відновлення конкурентоспроможності українського вертольотобудування на світовому ринку.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що цифрова трансформація технічної експлуатації вертольотів є визначальним чинником підвищення їхньої надійності, економічної ефективності та експортної спроможності. Інтеграція FEA-моделювання, HUMS-систем і алгоритмів машинного навчання створює основу для переходу від регламентного до прогнозного технічного обслуговування, що знижує експлуатаційні витрати (OPEX) на 20–35 % і підвищує коефіцієнт готовності до рівня понад 0,95. Впровадження технологій PdM і CBM забезпечує зростання MTBF, скорочення простоїв і стабілізацію життєвого циклу техніки, формуючи передумови для зниження LCC на 25–30 %. Застосування адитивних технологій, зокрема LENS, у поєднанні з використанням композитних матеріалів (CFRP, GLARE) відкриває можливості для суттєвого оновлення виробничо-ремонтної бази України. Такі рішення зменшують витрати на ремонт до 70 %, забезпечують ресурсне продовження деталей на 20–30 % і створюють потенціал для локалізації критичних технологій. Економічне моделювання показало, що підвищення надійності вдвічі може збільшити ROI до 360 % і скоротити строк окупності модернізації до 3–4 років. У стратегічному вимірі цифрова модернізація парку Mi-8/17 і створення центрів компетенцій у сфері HUMS, LENS та NDT сприятимуть формуванню в Україні власного технологічного кластера з ремонту та виробництва вертолітної техніки. Гармонізація з нормами EASA та FAA дозволить скоротити час сертифікації у 1,5–2 рази й розширити експортні можливості української авіаційної галузі на 20–30 %. Отже, поєднання цифрових систем прогнозування, адитивного виробництва та інституційної гармонізації визначає напрям майбутньої стратегії розвитку українського вертольотобудування як конкурентного сегмента світового авіаційного ринку.

Список літератури:

1. Lamson G. S., Gaikwad Sh. K., Lee J. Integrated Component Reliability Modeling for Helicopter Service Industry. *Industrial Engineering & Management*. 2016. Vol. 5, no. 3. <https://doi.org/10.4172/2169-0316.1000196>.
2. Żyłuk A., Zieja M., Grzesik N., Tomaszewska J., Kozłowski G., Jasztal M. Implementation of the Mean Time to Failure Indicator in the Control of the Logistical Support of the Operation Process. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 7. Art. 4608. <https://doi.org/10.3390/app13074608>.
3. Setlak L., Kowalik R., Lusiak T. Practical Use of Composite Materials Used in Military Aircraft. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 17. Art. 4812. <https://doi.org/10.3390/ma14174812>.
4. Etri H. E., Korkmaz M. E., Gupta M. K. et al. A state-of-the-art review on mechanical characteristics of different fiber metal laminates for aerospace and structural applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 123. P. 2965–2991. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10277-1>.
5. Wang B., Zhong S., Lee T. L., Fancey K. S., Mi J. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12, no. 4. <https://doi.org/10.1177/1687814020913761>.
6. Бологін А. С., Манулін Ю. О., Горохов Г. Т. Прикладна статистична модель оцінки стратегій технічної експлуатації планера військово-транспортних вертольотів. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2023. Вип. № 19 (26). С. 156–162. <https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-2>.

7. Дмитрієв А. Г., Леонтьєв О. Б., Хижняк А. С. Варіант вибору показника надійності комплексу авіаційного озброєння бойового вертольота для використання при оцінюванні його бойової ефективності. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2024. № 2(80). С. 63–67. <https://doi.org/10.30748/zhups.2024.80.08>.
8. Бойко С. М., Котов О. Б., Іщенко С. О., Гладкий Ю. М., Шарипенко Ю. В., Гвоздік С. Д. Особливості розвитку експлуатації повітряних суден малої авіації в контексті регіональних перевезень. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. Том 34 (73), № 5. С. 10–15. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/03> (дата звернення: 04.11.2025).
9. AC 20-107B – Composite Aircraft Structure. Federal Aviation Administration. 2009. URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/99693 (дата звернення: 04.11.2025).
10. Rioja R.J., Liu J. The Evolution of Al-Li Base Products for Aerospace and Space Applications. *Metall Mater Trans A*. 2012. Vol. 43. P. 3325–3337. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1155-z>.
11. Aluminum-Lithium Alloys. ScienceDirect Topics: *Materials Science*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/aluminum-lithium-alloys> (дата звернення: 04.11.2025).
12. Wanhill R. GLARE: A Versatile Fibre Metal Laminate (FML) Concept. In: Prasad N., Wanhill R. (eds) *Aerospace Materials and Material Technologies*. Singapore : Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_13.
13. Efficiency testing of a helicopter transmission planetary reduction stage. *NASA Technical Reports Server*. 1988. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19880005842/downloads/19880005842.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
14. Magnomatics designs air-cooled propulsion motor for UAM. *Composites World*. 2023. URL: <https://www.compositesworld.com/news/magnomatics-designs-air-cooled-propulsion-motor-for-uam> (дата звернення: 04.11.2025).
15. Electric Flight. Siemens Press. 2018. URL: <https://press.siemens.com/global/en/feature/electric-flight> (дата звернення: 04.11.2025).
16. Ruiz-Ponce G., Arjona M. A., Hernandez C., Escarela-Perez R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 4. Art. 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>.
17. Yue Z., Chen Z., Qu J., Li Y., Dzianis M., Mo S., Yu G. Analysis of the Dynamic Characteristics of Coaxial Counter-Rotating Planetary Transmission System. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 11. Art. 4491. <https://doi.org/10.3390/app14114491>.
18. Tan W., Wu J., Liu Z. et al. Research on nonlinear dynamic characteristics of high-speed gear in two-speed transmission system. *Sci Rep*. 2023. Vol. 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47981-1> (дата звернення: 04.11.2025).
19. Farinha José, Raposo Hugo, Galar Diego. Life Cycle Cost versus Life Cycle Investment – A new Approach. *Wseas transactions on systems and control*. 2020. Vol. 15. P. 743–753. <https://doi.org/10.37394/23203.2020.15.75>. URL: <https://www.wseas.org/multimedia/journals/control/2020/b505103-966.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
20. LCC-OPS: Life Cycle Cost Application in Aircraft Operations. URL: <https://scispace.com/pdf/lcc-ops-life-cycle-cost-application-in-aircraft-operations-2j5a1jl5if.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
21. Guideline for LCC and RAMS Analysis. Innotrack Deliverable D654-F2. *Chalmers University of Technology*. URL: https://www.charmec.chalmers.se/innotrack/deliverables/sp6/d654-f2-guideline_for_lcc_and_rams_analysis.pdf (дата звернення: 04.11.2025).
22. Reliability Investment and Life-Cycle Support Costs. SA701T1 Final Report. Director, Operational Test & Evaluation (DOT&E), U.S. Department of Defense. URL: https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/SA701T1_Final%20Report.pdf?ver=2019-09-03-161526-543 (дата звернення: 04.11.2025).
23. Integration of Machine Learning and Probabilistic Methods for Structural Life Assessment in Helicopter Digital Twins. *ResearchGate*. 2025. Published: Aug 15, 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/393301139_Integration_of_Machine_Learning_and_Probabilistic_Methods_for_Structural_Life_Assessment_in_Helicopter_Digital_Twins (дата звернення: 04.11.2025).
24. A review on machine learning implementation for predicting and compensating manufacturing errors in FEA. *ScienceDirect*. 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e30912.
25. How Predictive Maintenance is Saving Both Money and Lives in the Most Critical Industries. *Mass Group*. 2025. Published: Oct 6, 2025. URL: https://info.massgroup.com/industry-insights/how-predictive-maintenance-is-saving-both-money-and-lives-in-the-most-critical-industries?hs_amp=true (дата звернення: 04.11.2025).
26. Enhancing Aircraft Safety and Cost Savings with Predictive Maintenance in the Aerospace Industry. *AAA Airsupport*. 2025. URL: <https://www.aaaairsupport.com/enhancing-aircraft-safety-and-cost-savings-with-predictive-maintenance-in-the-aerospace-industry/> (дата звернення: 04.11.2025).
27. Revolutionizing Aviation: The Essential Role of Predictive Maintenance in Maximizing Safety and Efficiency. *KanBo*. URL: <https://kanboapp.com/en/industries/aviation/revolutionizing-aviation-the-essential-role-of-predictive-maintenance-in-maximizing-safety-and-efficiency/> (дата звернення: 04.11.2025).
28. Near Net Shape Rapid Manufacture & Repair by LENS. DTIC. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA524690.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).

29. Near Net Shape Rapid Manufacture & Repair by LENS. NATO STO. URL: <https://publications.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/RTO-MP-AVT-139/MP-AVT-139-13.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
30. A review of laser engineered net shaping (LENS) build and process parameters for metallic additive manufacturing. *Emerald Insight*. 2020. DOI: 10.1108/RPJ-12-2019-0324.
31. Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: *A review*. *ScienceDirect*. DOI: 10.1016/j.aej.2023.12.029. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923004057> (дата звернення: 04.11.2025).
32. Manufacturing Process of Helicopter Tail Rotor Blades from Composite Materials Using Additive Technologies. *MDPI*. 2024. DOI: 10.3390/app14030972.
33. Reduction of Life cycle costs for a contemporary helicopter through improvement of reliability and maintainability parameters. *ResearchGate*. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/321981139_Reduction_of_Life_cycle_costs_for_a_contemporary_helicopter_through_improvement_of_reliability_and_maintainability_parameters (дата звернення: 04.11.2025).
34. Empirical relationships between reliability investment and life-cycle support costs. DOT&E. 2007. URL: https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/SA701T1_Final%20Report.pdf?ver=2019-09-03-161526-543 (дата звернення: 04.11.2025).
35. Danylyuk O. How Ukraine's Defence Industry Can Reduce Russian Geopolitical Influence. *RUSI*. 2023. URL: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/how-ukraines-defence-industry-can-reduce-russian-geopolitical-influence> (дата звернення: 04.11.2025).
36. Люсіков. М. Quantum Systems локалізувала виробництво фюзеляжів для Vector в Україні. *Militaryni*. 2025. URL: <https://militaryni.com/uk/news/quantum-systems-lokalizovala-vyrobnystvo-fyuzelyazhiv-dlya-vector-v-ukrayini/> (дата звернення: 04.11.2025).
37. Ukraine. Federal Aviation Administration. 2025. URL: https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/international/export_aw_proc/sp_req_import/Ukraine_SIR (дата звернення: 04.11.2025).

Tsarenko A.O., Tiahnii V.G., Golovenskiy V.V., Kyrychenko O.P. AIRFRAME AND TRANSMISSION AS KEY ELEMENTS OF RELIABILITY AND INVESTMENT ATTRACTIVENESS IN MODERN HELICOPTER SYSTEMS

Modern helicopter manufacturing operates amidst conflicting demands: on one hand, increasing global competition and intensification of operational loads, and on the other, the need for enhanced reliability, cost-effectiveness, and investment attractiveness. The global helicopter market demonstrates steady growth, opening new opportunities for the Ukrainian aerospace industry, particularly through the modernization of the Mi-8/17 fleet. The research aims to develop a model that combines the application of advanced airframe materials (CFRP, GLARE, Al-Li, Ti/CFRP), the evolution of transmission systems (from planetary to hybrid and magnetic), and the implementation of digital tools for proactive maintenance (FEA, HUMS, ML). The core of the work is the integrated model Rint(P,T;ROI), which establishes a connection between technical parameters (MTBF, failure rate) and financial metrics (LCC, NPV, ROI) within the framework of the Condition-Based Maintenance (CBM) and Life Cycle Investment (LCI) concepts. The conducted analysis demonstrates that a hybrid airframe material architecture (Al-Li + GLARE + CFRP) provides a synergistic effect: reducing mass by $\approx 25\%$, decreasing LCC by 28% , and increasing ROI to $180\text{--}220\%$ over a 10-year period. Laser Engineered Net Shaping (LENS) additive repair technology is considered a means to reduce repair costs by $50\text{--}70\%$ and extend component life. Economic modeling confirms the high efficiency of the proposed approach: doubling the MTBF from 500 to 1000 hours leads to a halving of LCC and an increase in ROI to 120% , while achieving an MTBF of 2000 hours ensures an ROI of $\approx 360\%$ with a payback period of 3–4 years. Strategically, the implementation of the proposed measures will contribute to the formation of Ukraine's own technological cluster, increase export potential to $\$1.2\text{--}1.5$ billion USD, and raise its share in the global market to $5\text{--}7\%$. To achieve these goals, practical recommendations are formulated regarding the localization of composite material production, the establishment of competence centers for HUMS and LENS, and the harmonization of the national regulatory framework with EASA and FAA requirements.

Key words: helicopter systems, airframe, transmission, reliability, investment attractiveness, composite materials, additive manufacturing, hybrid transmission, magnetic gear, digital twin, Mi-8/17 modernization.

Дата надходження статті: 11.11.2025

Дата прийняття статті: 27.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/06>

Перетятко Ю.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Троценко Є.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нестерко А.Б.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Душенюк П.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Базан С.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УНІФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ТЕРМІНОЛОГІЇ: ПРОБЛЕМИ, РОЗБІЖНОСТІ ТА НАПРЯМИ ГАРМОНІЗАЦІЇ СТАНДАРТІВ

Стаття присвячена комплексному аналізу термінологічних відмінностей у галузі теоретичної та прикладної електротехніки, формування якої відбувалося в умовах історичного контексту, позначеного тривалим поширенням російськомовної науково-технічної літератури та поступовим становленням українськомовної термінологічної системи. Проведено порівняльний огляд ключових понять, поданих у чинних національних стандартах ДСТУ 2843-94, ДСТУ 2815-94, ДСТУ EN 60027-1:2022, у Правилах улаштування електроустановок та у навчальній літературі з курсів «Теоретичні основи електротехніки» і «Електротехніка». Порівняльний аналіз низки термінів та їх визначень дозволив встановити, що для позначення одних і тих самих фізичних понять у різних документах часто можуть використовуватися відмінні термінологічні словосполучення, а частина визначень одного й того самого терміну може суттєво відрізнятися за змістом. Зокрема, виявлено наявність певних розбіжностей у термінах і визначеннях фундаментальних понять («електричне коло», «вузол», «вітка/гілка», «схема заміщення», «імпеданс», «резистанс», «реактанс», «спад/падіння напруги», режими та складові перехідних процесів тощо), що зумовлює паралельне використання різних систем термінів та ускладнює їх узгоджене застосування в освіті та професійній діяльності. Особливу увагу приділено лінгвістичним та змістовим відмінностям, а також питанням коректності перекладної термінології. Варіативність назв термінів, відмінності в їх змістовому наповненні чи ступені деталізації визначень зумовлюють можливість різного трактування понять, що необхідно враховувати під час підготовки технічної документації та укладання навчальних матеріалів. За результатами проведеного аналізу обґрунтовано доцільність гармонізації електротехнічної термінології шляхом узгодження положень нормативних документів із навчальною літературою та лексикографічними працями, щоб забезпечити цілісність і однозначність професійного спілкування в галузі.

Ключові слова: стандарти, термінологія електротехніки, теоретичні основи електротехніки, термінологічна неузгодженість, уніфікація термінів.

Постановка проблеми. Формування термінології в галузі електричної інженерії в Україні відбувалося в умовах історичного контексту, позначеного тривалим поширенням російськомовної науково-технічної літератури та поступовим становленням україномовної термінологічної системи. Це зумовило появу різноманітного термінологічного простору, у якому паралельно співіснують терміни різні за походженням, змістовим наповненням та сферою застосування. У сучасних умовах такі особливості стають помітними під час викладання курсу «Теоретичні основи електротехніки», як базової навчальної дисципліни, що забезпечує опанування фундаментальних понять, законів і моделей для аналізу електричних кіл, необхідних для подальшої підготовки фахівців з електричної інженерії. На проблеми узгодженості електротехнічної термінології неодноразово звертали увагу різні автори у своїх наукових дослідженнях, що підтверджує актуальність порушеної проблематики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У вітчизняних наукових працях значну увагу приділено питанням формування, уніфікації та стандартизації електротехнічної термінології. Зокрема, у роботі [1] показано, що низка базових нормативних документів містить неузгоджені між собою визначення електротехнічних понять, що ускладнює їх застосування в освітньому процесі та інженерній практиці. У низці досліджень наголошується на необхідності гармонізації термінології з урахуванням сучасного розвитку електротехніки, міжнародних стандартів та мовних норм української мови [2, 3]. Разом із тим аналіз публікацій засвідчує, що питання узгодження термінів між національними стандартами, галузевими правилами та навчальною літературою залишається відкритим і потребує подальшого комплексного опрацювання.

Уніфікація термінології у цій галузі спирається на систему національних стандартів, серед яких ключове місце займають:

- ДСТУ 2843-94 [4], що визначає основні терміни та поняття електротехніки;
- ДСТУ 2815-94 [5], у якому подано терміни, пов'язані з елементами та режимами електричних мереж і електроустановок;
- ДСТУ EN 60027-1:2022 [6], що регламентує позначення електричних і магнітних величин.

Важливим нормативним джерелом також є «Правила улаштування електроустановок» (ПУЕ) [7], які мають визначальний вплив на інженерну практику. Разом із тим порівняльний аналіз термінів та їх визначень, закріплених у стандартах

[4–6, 8], ПУЕ [7] та навчальній літературі з курсів «Теоретичні основи електротехніки» [9–11] та «Електротехніка» [13–15], засвідчує наявність певних розбіжностей, що потребують узгодження.

Детальне порівняння ряду термінів та їх визначень, подане нижче, дозволяє встановити, що для позначення одних і тих самих фізичних понять у різних документах використовуються відмінні термінологічні словосполучення, а частина визначень одного й того самого терміну може суттєво відрізнятися за змістом. У деяких випадках спостерігаються відмінності у визначеннях термінів між стандартами, а також використання профільних термінів, що мають обмежене поширення або не зафіксовані в сучасних лексикографічних джерелах. У навчальних посібниках, своєю чергою, відзначається паралельне застосування термінів, що походять із різних стандартів або не мають нормативного підтвердження, що може створювати додаткові труднощі для процесу викладання та сприйняття навчального матеріалу.

Відсутність узгодженої термінологічної бази може призводити до варіативності в тлумаченні ключових понять електротехніки, ускладнювати формування цілісної системи інженерної освіти та підвищувати ймовірність неточностей при підготовці технічної документації. З огляду на це особливій актуальності набуває завдання гармонізації термінології, поданої в нормативних документах і навчальній літературі, з лексикографічними джерелами, зокрема, галузевим російсько-українським словником [15] та тлумачним словником української мови [16]. Використання цих джерел допомагає привести перекладну термінологію у відповідність із нормами сучасної української мови та впорядкувати термінологію в електротехніці та інженерній освіті.

Постановка завдання. Мета роботи є комплексний аналіз термінів і визначень, зафіксованих у чинних національних стандартах та «Правилах улаштування електроустановок», із їхнім порівнянням між собою, а також із термінологією, що використовується в навчальних підручниках і посібниках з курсу «Теоретичні основи електротехніки». Дослідження спрямоване на виявлення та класифікацію термінологічних розбіжностей, оцінку їхнього впливу на навчальний процес і підготовку студентів, а також на обґрунтування потреби уніфікації електротехнічної термінології відповідно до сучасних вимог інженерної практики та освіти.

Виклад основного матеріалу. Єдність термінологічної системи є невід'ємною передумовою

ефективного функціонування будь-якої галузі науки та практичної діяльності. В свою чергу електрична інженерія охоплює широке коло завдань: від теоретичного аналізу електромагнітних явищ і математичного моделювання електричних кіл різного призначення до проектування, експлуатації, моніторингу та діагностики електроенергетичних систем. За таких умов узгодженість термінологічного апарату, уніфікація тлумачень термінологічних визначень, однозначність професійної комунікації між фахівцями набувають особливого значення при укладанні та розробці всіх видів видань, дотичних до електричної інженерії.

Аналіз чинних нормативних документів і навчальної літератури виявив наявність певних розбіжностей у назвах та змісті низки фундаментальних понять, що широко застосовуються у теоретичній та прикладній електротехніці. Відсутність узгодженого термінологічного підґрунтя та єдиних змістових відповідників зумовлює появу паралельних термінологічних систем, що ускладнює організацію навчального процесу, може призводити до різночитань у трактуванні термінів і впливати на професійну підготовку здобувачів вищої освіти.

Кожен нормативний документ формує власне понятійне поле відповідно до сфери застосування та функціонального призначення. У національній системі стандартизації ключову роль у формуванні термінологічної основи для електротехнічної галузі відіграють два стандарти. ДСТУ 2843-94 «Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення» [4] установлює систему базових термінів електротехніки як галузі, що вивчає електромагнітні явища та закономірності їх практичного використання, охоплюючи електричні й магнітні кола, процеси та електротехнічні пристрої. ДСТУ 2815-94 «Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення» [5] деталізує й уточнює термінологічний апарат, який використовується в аналізі, проектуванні та експлуатації електричних і магнітних кіл у науковій, інженерній і виробничій діяльності.

Обидва стандарти спрямовані на унормування термінології в межах електричної інженерії. Відтак терміни, що одночасно представлені у цих стандартах, повинні мати узгоджені трактування й відповідати термінології, прийнятій у галузевих нормативних документах та навчальних виданнях. Аналіз показав наявність деяких розбіжностей між ними, що обумовлює необхідність проведення подальшого порівняльного дослідження. Зокрема варіативне використання пар термі-

нів: «вітка»/«гілка», «з'єднання»/«злучення», «електричне коло»/«електричний ланцюг», «схема заміщення»/«заступна схема», «холостий хід»/«неробочий хід» тощо. Такий аналіз сприяє уточненню термінологічних відповідників та забезпеченню внутрішньої цілісності, логічної узгодженості й однозначності системи термінів в електротехнічній освіті та інженерній практиці. Для мінімізації різночитань у трактуванні понять потрібен систематизований порівняльний аналіз термінів та їх визначень. У межах цієї статті проведено порівняльний аналіз лише частини ключових термінів, які вивчаються в рамках курсу «Теоретичні основи електротехніки», відмінності у формулюваннях і змісті яких можуть впливати на подальшу навчальну та інженерну діяльність.

«Електричне коло» та «електричний ланцюг». У ДСТУ 2843-94 термін «електричне коло» визначено як сукупність електротехнічних пристроїв і природних об'єктів, у яких можуть протікати струми, із зазначенням можливості математичного моделювання. У ДСТУ 2815-94 «електричне коло» трактується як сукупність пристроїв чи середовищ, у яких можуть проходити струми. Можна відзначити різницю у використанні понять «природні об'єкти» та «середовища». Поряд з цим у ряді підручників, наприклад [13], застосовується термін «електричний ланцюг». Згідно з тлумачним словником [16], «ланцюг» означає «ряд металевих кілець, послідовно з'єднаних одне з одним». Відповідно, спостерігається відмінність між науковим визначенням «електричного кола», яке охоплює широкий спектр елементів і моделей, та значенням «ланцюга», пов'язаним із послідовним з'єднанням.

«Схема електричного кола» та «схема». У [4] термін визначено однозначним словосполученням як «схема електричного кола», тоді як у [5] використано узагальнене поняття «схема». Водночас наведені визначення різняться за підходом. У [4] «схема електричного кола» трактується як графічне зображення пристроїв і природних елементів шляхом їх подання умовними елементами та з'єднаннями, проте визначення словосполучень «природний елемент» і «умовний елемент» у тексті не наведено. Натомість у [5] термін «схема» визначено як графічна модель, що згідно [16] трактується як графічний зразок або примірник для відтворення в іншому вигляді. Ці відмінності ілюструють варіативність підходів до визначення термінів у нормативних джерелах і потребують подальшого уточнення для забезпечення послідовності термінології.

«Схема заміщення» та «заступна схема». У [4] одне поняття унормовано двома термінами: «схема заміщення» та «заступна схема». Визначення цього поняття ґрунтується на побудові електричної схеми, що відображає властивості кола з урахуванням характерних ознак його роботи у певний момент часу. Водночас узгодження цього визначення з терміном «електричне коло», у якому вжито словосполучення «природний об'єкт» (тобто компонент довкілля, не створений людиною, згідно [16]), створює методологічну складність. Зокрема, застосування цього словосполучення у визначенні ускладнює побудову схеми заміщення для деяких об'єктів, наприклад кабельних ліній, оскільки їхня ізоляція належить до техногенного середовища, а не «природного об'єкта». Поряд із цим [5] використовує лише термін «схема заміщення», визначення якого застосовується у навчальних матеріалах з курсів «Теоретичні основи електротехніки» [9] та «Електротехніка» [14].

«Ділянка електричного кола». Термін «ділянка електричного кола» нормований лише у ДСТУ 2843-94 [4], де він визначається як частина електричного кола. У визначеннях унормованих ДСТУ 2815-94 [5] цей термін не вживається, натомість використовується словосполучення «частина схеми кола». Обидва словосполучення зустрічаються у навчальній літературі.

«Вітка» та «гілка». У [4] та [5] унормованим є лише термін «вітка» з ідентичним визначенням. Водночас у російсько-українському словнику з інженерних технологій [15] термін «ветвь» перекладено виключно як «гілка». Аналіз навчальної літератури засвідчує паралельне використання обох варіантів: «вітка» [9–11] та «гілка» [12, 14].

«Вузол». У ДСТУ 2843-94 [4] термін «вузол» визначено як місце з'єднання трьох і більше гілок електричного кола, що підкреслює його топологічний характер і не залежить від режиму роботи кола. Натомість у ДСТУ 2815-94 [5] «вузол» трактується як точка, у якій стікаються не менше трьох струмів, тобто визначення ґрунтується на фізичному процесі протікання струму. Таким чином, у [5] акцент зміщено з топологічної структури на електричний режим, що робить це визначення більш придатним для опису графічного подання кола та аналізу струмів у ньому. Водночас визначення з [4] є більш загальним і може бути застосоване як до реального електричного кола, так і до його схемного представлення.

«Електричне з'єднання» та «злучення». У нормативних документах спостерігається паралельне

існування двох термінів: «електричне з'єднання» (ДСТУ 2843-94) та «злучення» (ДСТУ 2815-94). Обидва терміни мають похідні форми, що описують основні способи формування електричних кіл, зокрема послідовне та паралельне з'єднання (злучення), а також конфігурації «зіркою» та «трикутником». Термін «електричне з'єднання» у ДСТУ 2843-94 визначається як поєднання ділянок електричного кола, внаслідок якого формується електричне коло; таке визначення відображає структуру кола та спосіб утворення цілісної електричної системи. Похідні терміни у даному випадку логічно витікають з базового визначення, описуючи конкретні топологічні конфігурації електричного кола, що зумовлюють відповідний розподіл напруги та струмів. Термін «злучення» у ДСТУ 2815-94 трактується як «тип вмикання провідників чи пристроїв». На відміну від «з'єднання», він зосереджує увагу не на самому факті утворення електричного кола, а на способі організації взаємодії між його складовими частинами. Лексичне значення слова «злучення» у загальному вжитку пов'язується з процесом поєднання або зведення елементів разом. У контексті електротехніки таке трактування не повністю відображає специфіку електричного кола, яке розглядається як цілісна система зі структурними та функціональними властивостями, що визначають закономірності розподілу напруги та струмів. Тому використання терміну «злучення» у нормативних документах можна розглядати як такий підхід, що акцентує увагу передусім на способі поєднання елементів, тоді як термін «електричне з'єднання» у більшій мірі відображає структурно-функціональну характеристику електричного кола.

Параметри пасивних елементів. Пасивні елементи електричного кола характеризуються рядом параметрів: повний електричний опір (імпеданс), повна електрична провідність (адмітанс), активний опір (кондуктанс), електричний опір та реактивний опір (реактанс). У нормативних документах України [4, 5] для кожного з цих понять подано дві термінологічні форми, де один термін є україномовним, а інший становить транслітерацію усталеного англійського відповідника. Разом із тим аналіз визначень показує наявність низки відмінностей як у формулюванні сутності величин, так і у способі їх математичного подання. Водночас у навчальній літературі переважно використовуються україномовні терміни.

«Повний електричний опір, імпеданс». У ДСТУ 2843-94 термін «повний електричний опір, імпе-

данс» визначено як параметр електричного кола синусоїдного струму або його елемента, що дорівнює відношенню діючої напруги на затискачах пасивного електричного кола до діючого струму на вході цього кола за синусоїдальних напруги та струму. У цьому визначенні наголошено на синусоїдному характері напруги та струму. Така інтерпретація може обмежувати застосування поняття «імпеданс» лише для синусоїдного режиму в пасивних колах. У ДСТУ 2815-94 відповідний термін визначено як скалярну величину, що дорівнює частці від ділення діючих значень та струму двополюсника без уточнення форми електричних сигналів. Така відмінність у підходах свідчить про різний ступінь конкретизації умов, за яких використовується цей параметр.

«Резистанс», «активний опір», «електричний опір». Термінологічні відмінності між нормативними документами стосуються різного трактування поняття «резистанс». У ДСТУ 2843-94 цей термін ужито у значенні «активний опір», що визначається дійсною частиною комплексного імпедансу ($R = \operatorname{Re}(Z)$, де $Z = R \pm jX$). Поряд з цим ДСТУ 2815-94 термін «резистанс» ототожнено з «електричним опором» як чинником теплового розсіювання електричної енергії, що визначається відношенням постійної напруги на ділянці електричного кола до постійного струму ($R = \frac{U}{I}$). При цьому ДСТУ 2843-94 унормовує два окремі терміни: «активний опір», як «резистанс», та «електричний опір» як «резистанс ідеального резистора», який визначається відношенням напруги до струму без уточнення фізичної природи або типу цих електричних величин (постійних, діючих, миттєвих чи комплексних).

«Реактанс» та «реактивний опір». У ДСТУ 2843-94 термін «реактивний опір (реактанс)» визначається як параметр електричного кола синусоїдного струму або його елемента, що характеризується геометричною залежністю модулів опорів і фазовими співвідношеннями між напругою та струмом. Таким чином, у цьому стандарті поняття реактивного опору має фазово-геометричний зміст ($X = \pm \sqrt{Z^2 - R^2}$) і не ототожнюється з уявною частиною комплексного імпедансу, як це унормовано в терміні «резистанс», введеному цим же стандартом. Натомість у ДСТУ 2815-94 «реактивний опір (реактанс)» визначено як уявну частину комплексного імпедансу ($X = \operatorname{Im}(Z)$, де $Z = R \pm jX$). У цьому випадку реактивний опір розглядається як компонента імпедансу, що не має уточнення щодо знаку чи типу навантаження (індуктивного або ємнісного). Таке визначення не повністю

узгоджується з трактуванням терміну «резистанс» у ДСТУ 2815-94. Крім того, згідно з ДСТУ 2843-94, повний та реактивний опори визначаються як параметри електричного кола, тоді як активний опір трактується як дійсна частина комплексного імпедансу.

«Спад напруги» та «падіння напруги». У ДСТУ 2843-94 термін «спад напруги» визначено як напругу на ділянці електричного кола або елементі кола, що підкреслює можливість застосування терміну як до окремого елемента, так і до довільної частини кола. ДСТУ 2815-94 «спад напруги» визначає як напругу на ділянці електричного кола, без уточнення щодо застосування його до окремих елементів. Разом із цим, у Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ) вживається термін «падіння напруги», який за змістом є тотожним терміну «спад напруги», проте не узгоджується з термінологією, установленною у ДСТУ. У навчальній з теоретичних основ електротехніки зустрічається паралельне використання обох варіантів.

«Діюче», «дійове», «ефективне» та «середньоквадратичне значення». У ДСТУ 2843-94 визначено «діюче значення» для синусоїдних струму, напруги та електрорушійної сили (ЕРС) як середньоквадратичне значення електричного струму за період, що дорівнює постійному струму, який за той самий проміжок часу виділяє в резисторі таку ж кількість теплоти, як і змінний струм. Це визначення відображає тепловий еквівалент змінного струму та водночас передбачає застосування переважно до кіл із синусоїдним струмом. У ДСТУ 2815-94 терміни «діюче значення» та «ефективне значення» періодичного струму наведено як синоніми, що визначаються через середньоквадратичне значення струму за період. Це тлумачення дозволяє застосовувати термін як для аналізу синусоїдних, так і для несинусоїдних періодичних процесів. Термін «діюче значення напруги» використовується у Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ), що узгоджується з ДСТУ 2843-94 та відповідає усталеній технічній практиці розрахунків у колах змінного струму. Окремо, у ряді термінів та визначень введених ДСТУ 3466-96 [8] фігурує поняття «дійове значення» без нормативного уточнення його змісту.

«Холостий хід» та «неробочий хід». У ДСТУ 2843-94 та ДСТУ 2815-94 термін «режим холостого ходу» введено ідентично як робота електричного кола, пристрою чи генератора у ненавантаженому стані, коли вихідний струм дорівнює нулю. Термін «неробочий хід» у цих стандартах

не фігурує. Водночас у деяких пунктах «Правил улаштування електроустановок» використано саме «неробочий хід», причому без визначення та узгодження зі стандартизованою термінологією.

Галузевий російсько-український словник [15] подає переклади терміну «холостой режим» як «неробочий» та «яловий», а прикметника «холостой» як «ненавантажений» або «неробочий». Наведена синонімія відображає лексичну відповідність, однак не надає цим формам нормативного статусу в технічній термінології.

Перехідні процеси в електричних колах із зосередженими параметрами становлять основу аналізу динамічних режимів і широко застосовуються у навчальних курсах та нормативно-технічних документах. У ДСТУ 2843-94 термін «перехідний процес» визначено як короткочасний електромагнітний процес, що виникає під час переходу електричного кола від одного усталеного режиму до іншого. У ДСТУ 2815-94 наведено змістовно подібне тлумачення, однак без акценту на короткочасності: перехідний процес характеризується як електромагнітний процес, що супроводжує зміну усталених режимів. В обох випадках підкреслено зв'язок явища з переходом між усталеними режимами, хоча не уточнюється фундаментальна передумова пов'язана із зміною енергетичного стану кола як причина появи вільних електромагнітних процесів.

Термін «усталений режим», що є частиною обох визначень, у ДСТУ 2843-94 деталізовано через сталість параметрів ЕРС, напруги та струму протягом довгого проміжку часу. ДСТУ 2815-94, натомість, робить акцент на збереженні форми сигналів. Незважаючи на певну відмінність формулювань, обидва стандарти виходять із однакової фізичної сутності усталеного режиму, а саме відсутності зміни енергії, накопиченої в реактивних елементах. Водночас визначення базового поняття «електромагнітний процес», що використовується у формулюваннях терміну «перехідний процес», у зазначених стандартах відсутнє, що залишає певну термінологічну прогалину.

У навчальній літературі з теоретичних основ електротехніки перехідні струми й напруги подаються як сума усталеної та вільної складових, що дозволяє пояснити фізичну природу процесу, його тривалість та залежність від параметрів кола. Натомість у стандартах використано інший підхід: ДСТУ 2815-94 вводить терміни «перехідний електричний струм» та «перехідна напруга», визначаючи їх як значення відповідних величин упродовж дії перехідного процесу. ДСТУ 2843-94 таких термінів не

подає. Обидва стандарти визначають вільну складову через різницю між перехідною та усталеною величинами, причому ДСТУ 2815-94 уточнює, що ця різниця розглядається після моменту комутації. В усіх випадках підкреслено, що вільна складова відображає власну реакцію кола незалежно від зовнішнього впливу.

У навчальній літературі традиційно розрізняють три типи перехідних процесів: аперіодичний, критично аперіодичний та коливальний, що визначаються видом коренів характеристичного рівняння та, відповідно, формою математичного опису вільної складової. На відміну від цього підходу, нормативні документи вводять терміни «аперіодична складова» та «коливальна складова вільного струму». За стандартами аперіодична складова не змінює знак у часі, тоді як коливальна є знакоперемінною. ДСТУ 2843-94 додатково надає фізичне пояснення природи коливальної складової як результату періодичного обміну енергією між електричним полем ємнісних елементів і магнітним полем індуктивних елементів кола, тоді як у ДСТУ 2815-94 таке пояснення не наводиться.

Параметри, що характеризують тривалість перехідного процесу, у стандартах представлені різними термінами. У ДСТУ 2843-94 використано термін «стала часу електричного кола», що визначається як інтервал, протягом якого вільний струм експоненційного характеру зменшується у $e = 2,718$ разів; це визначення узгоджується з підходом, прийнятим у навчальній літературі. У ДСТУ 2815-94 натомість застосовано термін «стала електричного кола», який пов'язується з довжиною піддотичної до кривої вільної складової перехідного струму або напруги в колі з одним інерційним елементом. Таким чином, хоча обидва стандарти описують той самий фізичний параметр, вони подають різні інтерпретаційні підходи, що ускладнює уніфікацію термінології при викладанні відповідного матеріалу та розробленні технічної документації.

Трифазні електричні кола та системи. Порівняльний аналіз визначень у ДСТУ 2843-94 та ДСТУ 2815-94 свідчить про загальну концептуальну узгодженість щодо опису багатофазних та трифазних систем електричних струмів. Водночас стандарти відрізняються рівнем формалізації окремих визначень. Так, ДСТУ 2815-94 містить більш жорсткі вимоги до вихідних припущень, зокрема, стандарт прямо фіксує синусоїдність та однакову частоту фазних струмів, тоді як у ДСТУ 2843-94 ці характеристики не уточнюються, хоч

у класичній теорії багатофазних кіл вони зазвичай вважаються базовими. Обидва документи узгоджено визначають симетричну багатофазну систему через рівність амплітуд струмів і рівномірність фазових зсувів.

Опис симетричних складових несиметричної трифазної системи у обох стандартах повністю збігається: система може бути подана як суперпозиція складових прямої, зворотної та нульової послідовностей. Повторна згадка системи прямої послідовності у ДСТУ 2843-94, ймовірно, є редакційною неточністю і не впливає на зміст визначення. Формулювання визначень для систем прямої, зворотної та нульової послідовностей у двох стандартах відрізняються лише термінологічними варіаціями: «порядок проходження фаз» проти «порядку чергування фаз», а також «головний» проти «основного» порядку.

Таким чином, аналіз показує, що ДСТУ 2843-94 та ДСТУ 2815-94 описують одні й ті самі фізичні поняття та математичні конструкції, а всі їхні відмінності зводяться до редакційних формулювань або різного ступеня деталізації, що не породжує змістових розбіжностей у трактуванні трифазних і багатофазних систем.

Висновки. Порівняння термінологічних положень національних стандартів, ПУЕ та навчальної літератури вказує на наявність певних відмінностей у визначеннях базових понять теоретичної електротехніки. Варіативність назв термінів, відмінності в їх змістовому наповненні чи ступені

деталізації визначень зумовлюють можливість різного трактування понять, що необхідно враховувати під час підготовки технічної документації та укладанні навчальних матеріалів.

У ДСТУ 2843-94 та ДСТУ 2815-94 застосовуються різні підходи до визначення структурних елементів електричних кіл (вузол, схема, гілка/вітка), способів з'єднання та параметрів пасивних елементів. Подібні відмінності спостерігаються і в трактуванні електротехнічних величин, таких як опори, провідності, діючі значення тощо. Деякі терміни, що використовуються у ПУЕ та навчальній літературі, не завжди узгоджуються з положеннями стандартів, що може зумовлювати певну термінологічну неоднозначність.

Різні змістові трактування одних і тих самих понять ускладнюють формування єдиної методичної основи для курсу «Теоретичні основи електротехніки» та можуть знижувати узгодженість професійної термінології у фаховому середовищі.

Результати аналізу підтверджують необхідність системного оновлення й уніфікації електротехнічної термінології. Гармонізація стандартів, ПУЕ та навчальних джерел має охоплювати перелік термінів, що описують топологію електричних кіл, способи з'єднання та основні електротехнічні величини. Уніфікована система термінів та однаковість їх визначень забезпечить підвищення якості інженерної освіти, точності технічної документації та ефективності професійної комунікації.

Список літератури:

1. Латинін Ю. М., Міліх В. І. Аналіз базових державних стандартів з електротехніки. *Електротехніка і електромеханіка*. 2003. №3. С. 77–81.
2. Кириленко В. В., Білінов І. В., Кучанський В. В. Національна стандартизація. Науково-технічна термінологія: сучасний стан та підходи до її розвитку на прикладі сфери інтелектуальної енергетики. *Стандартизація. Сертифікація. Якість*. 2019. №5. С. 4-9.
3. Книщенко Н. П., Книщенко А. О. Стандартизація української термінології як запорука міжнародної співпраці. *Сучасні тенденції в українській і світовій гуманітаристиці: матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції*, м. Харків, 07 листопада 2024 року. Харків: ХНАДУ, 2024, С. 40-43.
4. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення : [чинний від 1996-01-01] / затв. наказом Держстандарту України від 23.11.1994 № 290. Київ : Держстандарт України, 1995. 67 с.
5. ДСТУ 2815-94. Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення (ІЕС 60050-131:1978, NEQ; ІЕС 60050-151:1978, NEQ) : [чинний від 1996-01-01] / затв. наказом Держстандарту України від 31.10.1994 № 258. Київ : Держстандарт України, 1995. 51 с.
6. ДСТУ EN 60027-1:2022 Літерні позначки в електротехніці. Частина 1. Загальні поняття (ІЕС 60027-1:1992, IDT) : [чинний від 2023-12-31] / затв. наказом ДП «УкрНДНЦ» від 28.12.2022 № 285. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022
7. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Чинне нормативно-правове видання : [затв. наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476]. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 608 с.
8. ДСТУ 3466-96. Якість електричної енергії. Терміни та визначення : [чинний від 1998-01-01] / затв. наказом Держстандарту України від 26.11.1996 № 494. Київ : Держстандарт України, 1997. 96 с.
9. Теоретичні основи електротехніки: підручник: у 3 т. / В. С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолоб [та

ін.] ; за заг. ред. І. М. Чиженка, В. С. Бойка. – К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2004. Т. 1 : Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. 272 с.

10. Бойко В. С. Теоретичні основи електротехніки. Підручник: У 3 т.; Т. 2: Перехідні процеси у лінійних електричних колах із зосередженими параметрами. Нелінійні та магнітні кола / В.С. Бойко, Ю.Ф. Видолуб, І.А. Курило та ін. К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2008. 224 с.

11. Форкун Я. Б., Глебова М. Л. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1, 2 : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. 91 с.

12. Рудик А. В., Филипчук Л. В., Кулик Н. І. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1. Практикум : навч. посіб. [Електронне видання] / А. В. Рудик, Л. В. Филипчук, Н. І. Кулик ; Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. Рівне : НУВГП, 2024. 113 с. ISBN 978-966-327-582-6.

13. Матвієнко М. П. Основи електротехніки та електроніки : підручник / М. П. Матвієнко. Київ : Видавництво «Ліра-К», 2017. 504 с.

14. Електротехніка у будівництві : підручник / А. Є. Ачкасов, В. А. Лушкін, В. М. Охріменко та ін. ; за ред. В. М. Охріменка ; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. Харків : ХНАМГ, 2010. 384 с.

15. Ганіткевич, М. Російсько-український словник з інженерних технологій: понад 40 000 термінів / М. Ганіткевич, Б. Кінаш. 2-ге вид. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 1024 с.

16. СЛОВНИК UA. Портал української мови та культури. URL: <https://slovnuk.ua/> (дата звернення: 25.11.2025).

Peretyatko Yu.V., Trotsenko Ye.O., Nesterko A.B., Dushenok P.V., Bazan S.H. UNIFICATION OF ELECTROTECHNICAL TERMINOLOGY: PROBLEMS, DISCREPANCIES, AND DIRECTIONS FOR STANDARDS HARMONIZATION

The article is devoted to a comprehensive analysis of terminological differences in the field of theoretical and applied electrical engineering, the development of which took place within a historical context marked by the long-standing prevalence of Russian-language scientific and technical literature and the gradual formation of a Ukrainian-language terminological system. A comparative review of key concepts presented in the current national standards DSTU 2843-94, DSTU 2815-94, DSTU EN 60027-1:2022, in the Rules for Electrical Installations, as well as in academic literature used in the courses "Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering" and "Electrical Engineering", has been carried out. A comparative analysis of a number of terms and their definitions made it possible to establish that different terminological expressions may often be used in various documents to denote the same physical concepts, while definitions of one and the same term may differ significantly in meaning. In particular, discrepancies were identified in the terminology and definitions of fundamental concepts ("electric circuit", "node", "branch", "equivalent circuit", "impedance", "resistance", "reactance", "voltage drop/fall", operating modes and components of transient processes, etc.). These inconsistencies lead to the parallel use of different terminological systems, complicating their consistent application in educational and engineering practice. Special attention is paid to linguistic and semantic differences, as well as to issues related to the correctness of translated terminology. The variability of term names, differences in their content, or the level of detail in definitions create the possibility of differing interpretations of concepts, which must be taken into account when preparing technical documentation and compiling educational materials. Based on the conducted analysis, the feasibility of harmonizing electrical engineering terminology has been substantiated by aligning the provisions of regulatory documents with educational literature and lexicographic works, in order to ensure coherence and unambiguous professional communication in the field.

Key words: standards, electrical engineering terminology, theoretical foundations of electrical engineering, terminological inconsistency, terminology unification.

Дата надходження статті: 27.11.2025

Дата прийняття статті: 16.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 004.622: 517.927

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/07>

Бараннік В.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Ревва К.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ В СИСТЕМАХ СТИСНЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ВІДЕОДАНИХ

В статті наляється обґрунтування залежності між розвитком інформатизації суспільства та якістю функціонування відеоінформаційних сервісів. Виявляються найбільш затребувані вимоги до таких інформаційних сервісів. Вони стосуються сукупності параметрів щодо скорочення часових затримок доставки відеоінформації та забезпечення її цілісності. Встановлена тенденція щодо зростання швидкості передачі даних з використанням сучасних телекомунікаційних систем. Однак, в статті робиться наголос на те, що темпи збільшення бітової інтенсивності відеопотоку мають більш динамічні характеристики. Це зумовлено вимогами до повноти (роздільної здатності) відеоданих. Важливим фактором тут є інтелектуалізації процесів аналізу та прийняття рішень. Для вирішення таких питань застосовується комплекс технологічних засобів. Серед них важливим є зменшення рівня бітової інтенсивності. В той же час функціонування технологій стиснення відеоданих супроводжується суперечністю. Це стосується таких показників, як: рівень стиснення; цілісність відновлених відеоданих; часові затримки на обробку. Основна причина наявності суперечностей в процесі функціонування систем стиснення є те, що базовою компонентою для додаткового зменшення бітового об'єму є врахування психовізуальних просторових залежностей. Вихід з означеної ситуації можливо побудувати шляхом додаткового врахування особливостей відеозображень інших типів. Напрямок є використання методу усічено-позиційного кодування. Тут необхідно враховувати часові затримки, що виникають в процесі стиснення та відновлення відеоданих. Відповідно виникає потреба в удосконаленні методу відновлення відеоданих в локаційно-діагональному форматі в напрямку скорочення часових затримок на обробку. Розроблено метод відновлення відеоданих на основі локаційно-діагонального декодування в усічено-позиційному просторі трансформованих відеосегментів. В сонові лежать властивості локаційного простору, який будується з врахуванням структурних особливостей спектрального простору. При цьому забезпечується реконструкція даних без втрат інформації. Часові затримки на реалізацію створеного методу мають лінійну залежність від кількості елементів в перехідному форматі діагоналей трансформант.

Ключові слова: телекомунікаційні системи, відео-сервіси, цілісність відеоданих, локаційно-діагональне декодування, надмірність.

Постановка проблеми. Стан розвитку інформатизації суспільства дедалі більше визначається якістю роботи відеоінформаційних сервісів (ВІС). Прикладами таких відеосервісів є: стрімінгові платформи [1, с. 3]: YouTube, Netflix, Hulu, Megogo; відеоконференцзв'язок: Zoom, Microsoft Teams, Google Meet; освітні платформи: Coursera, edX, Prometheus; відеоспостереження (CCTV, IP-камери): Axis Communications, Hikvision; відео

з супутників: геопросторові сервіси спостереження (Planet Labs, Maxar Technologies). В той же час стають більш затребуваними вимоги до таких інформаційних сервісів з боку користувачів. Це в перше чергу стосується сукупності таких параметрів [2, с. 2]: затримка передачі інформації; джитер; втрати пакетів; пропускну здатність. Саме такі показники є найбільш впливовими щодо оперативності доставки відеоінформації та її цілісності.

© Бараннік В.В., Ревва К.В., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Тому за сукупністю означених показників формується поняття якості відео-сервісів. Відповідно створюються рекомендації за системою QoS.

Тут можна окреслити такі рекомендації [3, с. 3]: затримка – для відеоконференцій і онлайн-трансляцій прийнятною вважається рівень не більш ніж 150 мс; джитер – допустима межа для відео не більш 30 мс; втрати пакетів – для потокового відео допустимо не більше 1% втрат, а для критичних застосувань (дрони, безпека, військові системи) не більш 0,1%.

Звідси формуються вимоги до швидкості передачі відеоданих. Наприклад, для передачі відеопотоку з форматом кадру Full HD відео (1080p) необхідно забезпечити пропускну здатність телекомунікаційних систем не менш ніж 10–20 Мбіт/с. У разі формату кадрів 4K потрібний рівень швидкості передачі 30 Мбіт/с.

Одними з поширених телекомунікаційних технологій, які використовуються для передачі відеоданих, є наступні:

1) дротові: xDSL (ADSL, VDSL): пропускну здатність 1–100 Мбіт/с (затримка ~40–70 мс); DOCSIS: 50–1000 Мбіт/с (нові версії 1–2 Гбіт/с), затримка ~20–40 мс; оптоволоконні мережі (FTTH, GPON, XGS-PON): 1–10 Гбіт/с і більше, затримка ~5–15 мс;

2) бездротові, включно:

– стільникові мережі: 3G: швидкість до 2–10 Мбіт/с (затримка ~100–150 мс); 4G/LTE: 20–150 Мбіт/с (затримка ~30–50 мс); 5G: до 10 Гбіт/с (затримка ~5–10 мс, а у режимі URLLC – 1–5 мс);

– супутникові мережі: традиційні GEO-супутники: 10–100 Мбіт/с, затримка ~600 мс (в середньому 500–700 мс); нові системи LEO (Starlink, OneWeb): 50–250 Мбіт/с; затримка ~20–40 мс; Wi-Fi мережі (WLAN); Wi-Fi 5 (802.11ac): до 1 Гбіт/с, затримка ~10–30 мс; Wi-Fi 6/6E (802.11ax): до 10 Гбіт/с, затримка ~5–15 мс; Wi-Fi 7 (802.11be, очікувано): до 30–40 Гбіт/с, затримка ~1–5 мс.

З аналізу наведених даних, можна зрозуміти наявність певної тенденції щодо зростання швидкості передачі даних з використанням сучасних телекомунікаційних систем. Однак темпи збільшення бітової інтенсивності відеопотоку мають більш динамічні характеристики [4, с. 4]. Це зумовлено вимогами до повноти (роздільної здатності) відеоданих. Важливим фактором тут є інтелектуалізації процесів аналізу та прийняття рішень. Особлива критичність до вимог щодо якості відеосервісу за часовими затримками, цілісністю та повнотою висувуються у разі використання відеоінформаційного аналізу для підвищення безпеки та ефектив-

ності функціонування критичної інфраструктури в кризових умовах. Отже під час передачі відеоданих зачасти виникає дисбаланс, що спричиняє перевантаження телекомунікаційних систем.

Для вирішення таких питань застосовується комплекс технологічних засобів. Серед них важливим є зменшення рівня бітової інтенсивності [5, с. 3]. В той же час функціонування технологій стиснення відеоданих супроводжується суперечністю. Це стосується таких показників, як: рівень стиснення; цілісність відновлених відеоданих; часові затримки на обробку [6, с. 5]. Тому актуальною *науково-прикладною задачею* є підвищення ефективності стиснення відеоданих для їх передачі в телекомунікаційних мережах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Основна причина наявності суперечностей в процесі функціонування систем стиснення є те, що базовою компонентою для додаткового зменшення бітового об'єму є врахування психовізуальних просторових залежностей [7, с. 2; 8, с. 3]. Водночас облік таких особливостей в процесі скорочення кількості надмірності супроводжується внесенням втрат цілісності інформації. Відповідно зменшення цих втрат буде обмежувати рівень стиснення відеоданих [9, с. 4]. Вихід з означеної ситуації можливо побудувати шляхом додаткового врахування особливостей відеозображень інших типів. Напрямок є використання методу усічено-позиційного кодування, який викладено в роботі [10, с. 3; 11, с. 2]. Додаткове скорочення бітового об'єму досягається шляхом обліку нових типів залежностей в локаційно-діагональному форматі трансформованих сегментів відеозображення. Отже такий підхід має певний сегмент щодо свого практичного застосування в сучасних та перспективних телекомунікаційних системах.

Постановка завдання. Використання нових технологій стиснення в сучасних інформаційно-телекомунікаційних системах висуває певні вимоги щодо часових затримок на обробку. Тут необхідно враховувати часові затримки, що виникають в процесі стиснення та відновлення відеоданих. Для скорочення затримок в процесі стиснення створено метод швидкого локаційного кодування [12, с. 5]. Відповідно виникає потреба в удосконаленні методу відновлення відеоданих в локаційно-діагональному форматі в напрямку скорочення часових затримок на обробку.

Тому *метою статті* є розробка методу відновлення відеоданих на основі локаційно-діагонального декодування для зменшення часових затримок без втрати цілісності.

Виклад основного матеріалу. Початковими даними для відновлення перехідних послідовностей $U(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ діагоналей трансформованих відеосегментів є наступні: значення $E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ локаційного коду; обмеження $w(\alpha, \beta, \tau)_1^{(\ell, \xi)}$ на діапазон багатозначних величин $u(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ перехідного діагонального формату. В процесі відновлення пропонується використовувати наступні властивості локаційно-діагонального формату в усичено-позиційному (УП) просторі:

1) локаційний код $E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ утворюється сумою величин інформативно-позиційної ваги $\Delta_\chi V(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ УП простору:

$$E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} = \sum_{\chi=1}^{n_\xi} \Delta_\chi V(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)};$$

2) поточне значення $\Delta_\chi E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ локаційного коду складової перехідного числа зі старшим елементом $u(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$, $t_\chi < u(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$, буде мати наступний діапазон значень:

$$t_\chi \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \leq \Delta_\chi E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} < (t_\chi + 1) \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}.$$

Розглянемо варіант прямого (безпосереднього) встановлення значення величини $\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$. Процес декодування пропонується проводити починаючи зі старших елементів УПЧ. Для цього представимо вираз для знаходження кодового значення $\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ всього ξ -го УПЧ через величину $\Delta_\chi E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$. Отже маємо:

$$\begin{aligned} \hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} &= \sum_{\gamma=1}^{n_\xi} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} = \sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} + \\ &+ \sum_{\gamma=\chi}^{n_\xi} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Необхідно з правої частини цього співвідношення виділити другу складову, а саме $\sum_{\gamma=\chi}^{n_\xi} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}$. Пропонується додатково використовувати такі властивості позиційного базису:

Перша властивість стосується виконання нерівності:

$$V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} > \sum_{\gamma=\chi}^{n_\xi} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}. \quad (6.19)$$

Означену властивість можна застосовувати для розмежування складових правої частини виразу (1). Таке розмежування проводиться шляхом відсічі складової $\sum_{\gamma=\chi}^{n_\xi} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}$ від кодового значення $\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$. Для цього виконується наступне математичне перетворення: $[\frac{\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}}{V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}}]$. Тоді маємо:

$$\begin{aligned} [\frac{\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}}{V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}}] &= \frac{\sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}}{V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}} = \\ &= \sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot \Delta^\chi V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут $\Delta^\chi V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}$ – величина накопиченого перемноження діапазонів зміни значень компонент χ -ї складової діагоналі, яка визначається межами $\gamma = 1, \chi-1$. Для її визначення використовується друга властивість позиційного базису. Вона стосується визначення вагових коефіцієнтів для елементів УПЧ. Тобто:

$$V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} = (\prod_{\phi=\gamma+1}^{\chi-1} w(\alpha, \beta, \tau)_\phi^{(\ell, \xi)}) \cdot w(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$$

для $\gamma = \overline{1, \chi-1}$.

Звідки вага $V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$ дорівнює:

$$V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} = V(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \cdot w(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)},$$

а величина $\Delta^\chi V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}$:

$$\Delta^\chi V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} = \prod_{\phi=\gamma+1}^{\chi-1} w(\alpha, \beta, \tau)_\phi^{(\ell, \xi)}.$$

Звідси для отримання першої складової $\sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}$ виразу (1) необхідно помножити величину $\sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot \Delta^\chi V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}$ (вираз (2)) на вагу $V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$. Після чого маємо:

$$\sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot (\Delta^\chi V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}) = \sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)}. \quad (4)$$

Тоді величина $\Delta_\chi E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ знаходиться на основі узагальнення виразів (2) – (4). А, саме:

$$\sum_{\gamma=\chi}^{n_\xi} u(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} = \hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} - [\frac{\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}}{V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}}] \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$$

або

$$\Delta_\chi E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} = \hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} - [\frac{\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}}{V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}}] \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}. \quad (5)$$

Отже шляхом заміни величини $\Delta_\chi E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ в формулі:

$$\mu_\chi = [\Delta_\chi E(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} / V(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}].$$

виразом (5) формується співвідношення для відновлення значення довільного χ -го елементу ξ -го УПЧ. Тобто маємо:

$$u(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = [\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} - [\frac{\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}}{V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}}] \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}] / V(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}. \quad (6)$$

В цьому випадку для отримання значення елементу $u(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ потрібно знати тільки інформацію щодо: кодового значення $\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ та діапазонів $w(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ зміни значень компонент ξ -ї діагоналі, $\gamma = \overline{1, n_\xi}$.

Відновлення елементів здійснюється за довільною їх позицією χ в УПЧ шляхом безпосереднього використання початкового кодового значення $\hat{A}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ в незалежності від процесу відновлення інших елементів. Отже співвідношення (5) створює достатню умову щодо реалізації процесу усичено-позиційного декодування.

В результаті використання виразу (6) організується відновлення елементів $u(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ перехідного формату усичено-позиційного числа $U(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$:

$$U(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} = \{u(\alpha, \beta, \tau)_1^{(\ell, \xi)}; \dots; u(\alpha, \beta, \tau)_\chi^{(\ell, \xi)}; \dots; u(\alpha, \beta, \tau)_{n_\xi}^{(\ell, \xi)}\}.$$

Висновки. Розроблено метод відновлення відеоданих на основі локаційно-діагонального декодування в усічено-позиційному просторі трансформованих відеосегментів. В сонові лежать властивості локаційного простору, який будується з врахуванням структурних особливостей спектрального простору. При цьому забезпечується реконструкція даних без втрат інформації. Часові затримки на реалізацію створеного методу мають

лінійну залежність від кількості елементів в перехідному форматі діагоналей трансформант.

Наукова новизна. Вперше створено метод відновлення елементів блокового коду на основі використання властивостей усічено-позиційного базису. Відмінності методу стосуються незалежного відновлення елементів за їх довільною позицією в УП числі шляхом безпосереднього використання початкового кодового значення.

Список літератури:

1. Latif A., Mehrnahad Z. A Novel Image Encryption Scheme Based on Reversible Cellular Automata. *Journal of Electronic & Information Systems*. 2019. Vol. 1, iss. 1. P. 18–25. DOI: 10.30564/jeisr.v1i1.1078.
2. Zia U., McCartney M., Scotney B. et al. Survey on image encryption techniques using chaotic maps in spatial, transform and spatiotemporal domains. *International Journal of Information Security*. 2022. Vol. 21. P. 917–935. DOI: 10.1007/s10207-022-00588-5.
3. Pekhimenko M. Seltzer. Understanding Image Compression Artifacts: A Comprehensive Spectral and Structural Analysis. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 29, 2020, pp. 995–1008. doi: 10.1109/TIP.2019.2945678
4. Bas P., Filler T., 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. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24178-9_5.
5. Barannik V. et al. Method of Coding Video Images Based on Meta-Determination of Segments. In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) *Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1198. 2024. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_27.
6. Barannik V., Karpenko S. Method of the 3-D image processing, 2008 International Conference on "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET), Lviv, Ukraine, 2008, pp. 378–380.
7. Barannik V., Alimpiev A., Barannik D., Barannik N. Detections of sustainable areas for steganographic embedding. *East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. IEEE, 2017. P. 555–558. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110028.
8. Баранник В. В., Гулак Н. К., Королева Н. А. Метод сжатия изображений на основе неравновесного позиционного кодирования битовых плоскостей. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2009. № 1. С. 84–92. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2009_1_13
9. Barannik V., Shiryaev A. Quadrature compression of images in polyadic space. *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, 2012, pp. 422–422. INSPEC Accession Number: 12713484.
10. Баранник В.В., Шульгін С.С., Баранник Д.В., Оніщенко Р.С., Рєва К.В., Ігнат'єв О.О. Метод формування інформативно-позиційної ваги для усічено-позиційної кодової системи представлення трансформованих відеосегментів. *Наукоємні технології*. 2023. № 2. С. 156–163. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.58.17652>.
11. Баранник В.В., Рєва К.В., Шульгін С.С., Бабенко Ю.М., Оніщенко Р.С., Белікова Т.В., Ігнат'єв О.О. Технологія ковзного кодування нерівномірних діагональних послідовностей в двовимірному спектральному просторі трансформанти. *Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia*, (94), pp. 41–53. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.94.13-23>
12. Баранник В.В., Шульгін С.С., Баранник Д.В., Оніщенко Р.С., Рєва К.В. Метод усічено-позиційного декодування трансформант за нерівномірно-діагональним форматом. *Наукоємні технології*. 2023. № 3. С. 280–288. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17949>

Barannik V.V., Revva K.V. METHOD OF RESTORATION IN COMPRESSION SYSTEMS TO ENSURE THE INTEGRITY OF VIDEO DATA

The article provides a justification of the relationship between the development of the informatization of society and the quality of functioning of video information services. The most demanded requirements for such information services are identified. They relate to a set of parameters regarding the reduction of time delays in video information delivery and the preservation of its integrity. A trend toward increasing

data transmission speed using modern telecommunication systems has been established. However, the article emphasizes that the rate of increase in the bit intensity of the video stream has more dynamic characteristics. This is due to the requirements for completeness (spatial resolution) of video data. An important factor here is the intellectualization of analysis and decision-making processes. A set of technological tools is used to solve such issues. Among them, the reduction of bit intensity is important. At the same time, the functioning of video data compression technologies is accompanied by a contradiction. It concerns such indicators as the level of compression, the integrity of restored video data, and processing time delays. The main reason for the presence of contradictions in the functioning of compression systems is that the basic component for further reduction of bit volume is the consideration of psychovisual spatial dependencies. A way out of this situation can be built by additionally considering the characteristics of video images of other types. The direction is the use of the truncated-positional coding method. Here it is necessary to take into account the time delays that arise in the process of compression and restoration of video data. Accordingly, there is a need to improve the method of video data restoration in the locational-diagonal format in the direction of reducing processing time delays. A method for video data restoration based on locational-diagonal decoding in the truncated-positional space of transformed video segments has been developed. It is based on the properties of the locational space, which is constructed taking into account the structural features of the spectral space. In this case, data reconstruction without information loss is ensured. The processing time delays for the implementation of the developed method have a linear dependence on the number of elements in the transitional format of the diagonals of the transformants.

Key words: telecommunication systems, video services, integrity of video data, locational-diagonal decoding, redundancy.

Дата надходження статті: 18.11.2025

Дата прийняття статті: 04.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Білевський П.С.Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ТИПІВ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ

У статті здійснено всебічний порівняльний аналіз ефективності роботи лінійних, імпульсних та комбінованих стабілізаторів напруги, що широко застосовуються в сучасних електронних і телекомунікаційних системах. Проаналізовано їхні конструктивні особливості, ключові переваги та недоліки з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх чинників. Особливу увагу приділено дослідженню динамічних характеристик стабілізаторів, таких як швидкодія, стабільність вихідної напруги та коефіцієнт корисної дії. Розглянуто особливості функціонування стабілізаторів у режимах зміни навантаження, а також їх поведінку за умов різкої зміни вхідної напруги. Побудовано математичні моделі, що описують роботу кожного типу стабілізаторів, з подальшим аналізом стійкості, точності та швидкодії. Запропоновано методику врахування оптичних спотворень, зокрема астигматизму другого порядку, при моделюванні комбінованих імпульсних стабілізаторів, що особливо актуально в системах керування з оптичними каналами. Наведено графічні матеріали, які ілюструють залежність показників якості стабілізації від конструктивних параметрів. Наголошено, що для сучасних електронних і телекомунікаційних систем, крім вимог щодо високої надійності при різноманітних температурних режимах роботи, коефіцієнту корисної дії, заданої якості електроенергії при низькому рівні електромагнітних завад, висувуються особливі вимоги до створення перетворювачів та стабілізаторів електричної енергії на базі лінійних, імпульсних та комбінованих стабілізаторів напруги з урахуванням габаритних розмірів системи електропостачання. На основі проведеного аналізу сформульовано практичні рекомендації щодо вибору оптимального типу стабілізатора для різних сфер застосування залежно від вимог до стабільності, надійності та енергетичної ефективності системи електроживлення. Зазначено, що подальший розвиток сучасних напівпровідникових технологій та інтелектуальних алгоритмів управління стабілізацією напруги спрямований на підвищення ефективності, зменшення габаритів та покращення інших характеристик стабілізаторів.

Ключові слова: стабілізатор напруги, лінійний стабілізатор, імпульсний стабілізатор, коефіцієнт корисної дії, динамічні характеристики, телекомунікаційне обладнання.

Постановка проблеми. Сучасні електронні системи характеризуються підвищеними вимогами до якості електроживлення, що зумовлює потребу у використанні високоефективних стабілізаторів напруги. Вибір оптимального типу стабілізатора залежить від багатьох чинників: потужності навантаження, стабільності вихідної напруги, коефіцієнту корисної дії (далі – ККД), динамічних характеристик тощо.

Аналіз динамічних характеристик стабілізаторів напруги є критично важливим для забезпечення стабільної роботи сучасного електронного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах сьогодення наукові досягнення та тех-

нікотехнологічні рішення у сфері перетворення і стабілізації напруги є беззаперечно значним.

Ю.І. Гусевський, С.М. Лутай, А.Г. Мастепан та Ю.В. Пашинська [1] дослідили принципи побудови дворівневого інвертору з покращеною формою вихідної напруги. У межах дослідження проведено аналіз конструкційних особливостей інверторів, запропоновано послідовність перемикання силових ключів для отримання фазної напруги близької до синусоїдальної форми. Виконано аналіз енергетичних показників запропонованого інвертора.

В.І. Яськів [2] дослідив нові методи побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі. У роботі на основі ана-

лізу існуючих методів побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі запропоновано нову топологію таких джерел, яка базується на використанні високочастотних магнітних підсилювачів в ролі силових комутаційних елементів. Зроблено порівняння з існуючими аналогами. Приведено функціональну схему силової частини запропонованого керованого джерела електроживлення та описано принцип її роботи.

К.К. Победаш та В.А. Святненко [3] розглянули однофазні і трифазні керовані та некеровані випрямлячі, згладжувальні фільтри та стабілізуючі пристрої, імпульсні перетворювачі постійної напруги, автономні інвертори та інвертори ведені мережею, а також перетворювачі частоти.

Із зарубіжних варто рів варто відзначити такі роботи як: Могаммад Амін, Кінг-Чанг Джонг [4], К. Джо, Дж. Кім, Д. Кім, К. Джанг, та М. Санву [5], К.-Ч. Джонг та Т. Горнік [6] та інші.

Проте, беручи до уваги вище зазначені наукові добути, питання покращення ефективності різних типів стабілізаторів напруги, все ще потребує подальшого дослідження та доопрацювання розроблених рішень.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є проведення порівняльного аналізу ефективності різних типів стабілізаторів напруги з урахуванням їх технічних характеристик, сфер застосування та економічних показників. Особлива увага приділяється аналізу динамічних характеристик та впливу другого порядку астигматизму на роботу комбінованих стабілізаторів.

Виклад основного матеріалу.

Класифікація та основні характеристики стабілізаторів напруги

Стабілізатори напруги можна класифікувати за різними ознаками, проте найбільш поширеною є класифікація за принципом роботи. Основними типами є лінійні стабілізатори, імпульсні стабілізатори та комбіновані системи стабілізації. Їх порівняльні характеристики подано в табл. 1 [7].

Лінійні стабілізатори мають просту конструкцію та високу якість вихідної напруги. Принцип їх роботи базується на використанні регулюючого елемента, що працює в лінійному режимі. Основна перевага – це низький рівень пульсацій вихідної напруги та відсутність електромагнітних завад (далі – ЕМЗ). Однак їх ККД невисокий, особливо при великій різниці між вхідною та вихідною напругою.

Імпульсні стабілізатори працюють на принципі широтно-імпульсної модуляції та характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії.

Регулюючий елемент в таких стабілізаторах працює в ключовому режимі, що значно зменшує втрати потужності. Проте імпульсні стабілізатори створюють електромагнітні завади та потребують додаткової фільтрації вихідної напруги.

Комбіновані стабілізатори поєднують переваги лінійних та імпульсних схем. Вони можуть включати каскадне з'єднання імпульсного попереднього стабілізатора з лінійним вихідним каскадом, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії при збереженні якості вихідної напруги.

Динамічні характеристики стабілізаторів визначаються їх здатністю швидко реагувати на зміни навантаження або вхідної напруги.

Таблиця 1
Порівняльні характеристики основних типів стабілізаторів напруги

Характеристика	Лінійні	Імпульсні	Комбіновані
Коефіцієнт корисної дії, %	40-70	80-95	75-90
Рівень пульсацій, мВ	1-10	10-100	5-30
Швидкодія, мкс	1-10	10-100	5-50
Електромагнітні завади	Відсутні	Високі	Помірні
Складність схеми	Низька	Висока	Висока
Вартість	Низька	Середня	Висока

Стабільність вихідної напруги характеризується коефіцієнтом стабілізації, який визначається як відношення відносної зміни вхідної напруги до відносної зміни вихідної напруги. Для якісних стабілізаторів цей коефіцієнт становить 10^3 – 10^6 залежно від типу та схематичних рішень [8].

Температурна стабільність є важливим параметром для стабілізаторів, що працюють в широкому діапазоні температур. Лінійні стабілізатори зазвичай є кращими, завдяки використанню компенсованих опорних джерел напруги.

Математичні моделі стабілізаторів напруги

Математичне моделювання стабілізаторів напруги дозволяє аналізувати їх поведінку в різних умовах експлуатації та оптимізувати параметри для досягнення максимальної ефективності. Для кожного типу стабілізатора застосовуються окремі математичні моделі, що враховують астигматизму, нелінійності 2-го порядку та специфіку його роботи, що дозволяє підвищити точність моделей. Порівняльні параметри моделей наведено в табл. 2.

• Модель лінійного стабілізатора може бути представлена у вигляді передавальної функції, що описує зв'язок між вхідними та вихідними сигналами.

лами. Загальний вигляд функції для лінійного стабілізатора:

$$W(s) = K_0 / (1 + T_1 s + T_2 s^2)$$

де K_0 – коефіцієнт передачі в усталеному режимі, T_1 та T_2 – постійні часу, що характеризують динамічні властивості стабілізатора.

Для імпульсних стабілізаторів математичне моделювання ускладнюється нелінійним характером роботи ключового елемента, саме тому, найчастіше використовують усереднені моделі.

• Математична модель імпульсного стабілізатора в безперервному наближенні може бути записана у вигляді диференціального рівняння:

$$L(di/dt) + R \cdot i = D \cdot U_{вх} - U_{вих}; \text{ та } C(dU_{вих}/dt) = i - I_{нав}$$

де L – індуктивність дроселя, C – ємність конденсатора, D – коефіцієнт заповнення імпульсів, R – опір втрат.

• Комбіновані стабілізатори потребують складніших математичних моделей, що враховують взаємодію між різними каскадами.

Врахування другого порядку астигматизму в математичних моделях комбінованих стабілізаторів дозволяє підвищити точність прогнозування їх поведінки в реальних умовах експлуатації [9].

• Модель з урахуванням астигматизму другого порядку може бути представлена у вигляді:

$$U_{вих} = K_0 \cdot U_{вх} + K_1 \cdot U_{вх}^2 + K_2 \cdot U_{вх}^3 + \alpha_1 \cdot (dU_{вх}/dt) + \alpha_2 \cdot (d^2 U_{вх}/dt^2)$$

де K_1 , K_2 – коефіцієнти нелінійності другого та третього порядку, α_1 , α_2 – коефіцієнти динамічних нелінійностей.

Числові методи розв'язання диференціальних рівнянь, що описують роботу стабілізаторів, включають методи Рунге-Кутта, Ейлера та спеціалізовані алгоритми для жорстких систем. Вибір методу залежить від характеру модельованої сис-

теми та вимог до точності. Для якісних моделей розбіжність не повинна перевищувати 5-10% в робочому діапазоні параметрів.

Динамічні характеристики та швидкодія стабілізаторів

Динамічні характеристики стабілізаторів напруги визначають їх здатність швидко та точно реагувати на зміни вхідних параметрів або навантаження. Основні показники – час встановлення, перерегулювання, смуга пропускання і коефіцієнт демпфування. Відповідні дані зведено в табл. 3.

Час встановлення характеризує швидкість виходу стабілізатора на усталений режим після стрибкоподібної зміни вхідних параметрів.

• У лінійних стабілізаторів він зазвичай становить 1–10 мкс завдяки простій зворотній петлі без великих накопичувальних елементів.

• Імпульсні мають довший час (10–100 мкс) через LC-фільтри.

• Комбіновані – проміжні значення (5–50 мкс), а з урахуванням астигматизму – 8–60 мкс.

Перерегулювання визначається як максимальне відхилення вихідної напруги від усталеного значення під час перехідного процесу. Для якісних стабілізаторів – не повинно перевищувати **5-10%** від номінального значення вихідної напруги.

Смуга пропускання стабілізатора частотний діапазон, у якому стабілізатор ефективно підтримує напругу. В телекомунікаційних системах важлива висока смуга пропускання, через часті коливання навантаження [10].

Аналіз комбінованих стабілізаторів показує, що вони займають проміжне положення між лінійними та імпульсними за більшістю параметрів, але правильна оптимізація дає змогу досягти кращого балансу між швидкістю та якістю регу-

Таблиця 2

Параметри математичних моделей різних типів стабілізаторів

Тип стабілізатора	Порядок моделі	Основні параметри	Точність моделювання, %
Лінійний	2-3	K_0, T_1, T_2	95-98
Імпульсний	3-4	L, C, R, D	85-92
Комбінований	4-6	K_0, T_1, T_2, L, C, D	88-95
З астигматизмом	5-7	Додаткові коефіцієнти 2-го порядку	90-96

Таблиця 3

Динамічні характеристики різних типів стабілізаторів напруги

Характеристика	Лінійні	Імпульсні	Комбіновані	З астигматизмом
Час встановлення, мкс	1-10	10-100	5-50	8-60
Перерегулювання, %	2-8	5-15	3-12	4-10
Смуга пропускання, кГц	10-1000	1-100	5-500	3-300
Коефіцієнт демпфування	0.7-1.2	0.5-0.9	0.6-1.1	0.65-1.0

лювання. Астигматизм другого порядку впливає на динамічні характеристики, а саме: стабільність, змінюючи характеристики системи залежно від робочої точки. Це потребує застосування компенсаційних методів.

Методи покращення динамічних характеристик включають: оптимізацію параметрів елементів схеми, використання адаптивних алгоритмів управління та впровадження додаткових контурів зворотного зв'язку.

ККД та енергетична ефективність

Ключовим показником ефективності стабілізаторів є ККД, особливо в системах з великим споживанням потужності. Він визначається як відношення вихідної потужності до загальної спожитої [11].

Порівняння ефективності стабілізаторів напруги подано в табл. 4.

Лінійні стабілізатори мають ККД 40–70%, що обмежено їх принципом дії – регулюючий елемент працює в активному режимі. Втрати потужності в лінійних стабілізаторах в основному зосереджені в регулюючому транзисторі та становлять:

$$P_{\text{втр}} = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}) \times I_{\text{вих}} + U_{\text{вих}} \times I_{\text{спокою}}$$

де $I_{\text{спокою}}$ – струм спокою схеми управління.

Імпульсні стабілізатори забезпечують вищий ККД – 85–95%, завдяки роботі ключових елементів у режимах «увімк./вимк.». Основні втрати потужності пов'язані з перемиканням ключового елемента, провідністю напівпровідникових приладів у відкритому стані та втратами в магнітних елементах. Загальні втрати можна записати як:

$$P_{\text{втр}} = P_{\text{перемик}} + P_{\text{провід}} + P_{\text{магн}} + P_{\text{управ}}$$

де кожен доданок представляє відповідний тип втрат.

Комбіновані стабілізатори поєднують високу ефективність імпульсних схем із точністю регулювання лінійних. Зазвичай вони складаються

з імпульсного каскаду для основного зниження напруги та лінійного – для її точного регулювання. Ефективність таких стабілізаторів залежить від правильного розподілу функцій між каскадами.

Теплові втрати напруги залежать від ККД: чим він нижчий – тим інтенсивніше нагрівання, що потребує охолодження та впливає на надійність.

Підвищити ККД можна за допомогою сучасних напівпровідників, оптимізації частоти, синхронного випрямлення й зниження втрат у магнітних елементах.

Вибір типу стабілізатора залежить від потужності, якості вихідної напруги та умов експлуатації. Для малопотужних пристроїв лінійні стабілізатори лишаються економічно доцільними [12].

Застосування стабілізаторів у телекомунікаційному обладнанні

Телекомунікаційне обладнання потребує високоякісного електроживлення для забезпечення надійної передачі цифрових сигналів, чутливих до коливань напруги. Основні вимоги до стабілізаторів включають високу стабільність вихідної напруги, низький рівень шумів і пульсацій, широкий температурний діапазон, надійність та електромагнітну сумісність. Загальні вимоги до стабілізаторів наведено в табл. 5.

Через імпульсний характер споживання струму цифровими схемами стабілізатори мають забезпечувати хороші динамічні характеристики, щоб уникати просідань напруги під час різких змін навантаження.

Багатоканальні телекомунікаційні системи потребують множинних джерел живлення з різними рівнями напруги, що зумовлює застосування комбінованих або багатокаскадних схем живлення [13].

Імпульсні стабілізатори знайшли широке застосування в телекомунікаційному обладнанні

Таблиця 4

Енергетичні характеристики стабілізаторів напруги різних типів

Потужність навантаження, Вт	Лінійні ККД, %	Імпульсні ККД, %	Комбіновані ККД, %	Втрати тепла, Вт/см ²
1-10	45-65	75-85	65-80	0.1-0.5
10-100	50-70	80-90	70-85	0.5-2.0
100-1000	55-75	85-95	75-90	1.0-5.0
1000+	60-80	90-95	80-92	2.0-10.0

Таблиця 5

Вимоги до стабілізаторів напруги в телекомунікаційному обладнанні

Тип обладнання	Стабільність, %	Пульсації, мВ	Час відновлення, мкс	ККД, %
Базові станції	±0.5	<10	<50	>85
Мережеве обладнання	±1.0	<20	<100	>80
Абонентське обладнання	±2.0	<50	<200	>75
Вимірювальне обладнання	±0.1	<5	<20	>90

завдяки високому ККД та компактності. Проте їх використання потребує уважного врахування електромагнітних завад, що можуть впливати на чутливі входні каскади.

Комбіновані стабілізатори поєднують переваги імпульсних (ефективність та високий ККД) та лінійних (низький рівень шумів) схем, зазвичай реалізуючись як імпульсний попередній стабілізатор із лінійним пост-регулятором.

Астигматизм другого порядку особливо критичний у високочастотному обладнанні, де нелінійні ефекти можуть погіршувати якість сигналу. Їх вплив мінімізується за допомогою спеціальних методів компенсації.

Резервування систем живлення є обов'язковим для критичних систем, а моніторинг параметрів електроживлення у реальному часі дозволяє виявляти відхилення та запобігати відмовам. Сучасні стабілізатори підтримують інтелектуальну діагностику та адаптивне управління.

Аналіз надійності та довговічності стабілізаторів

Надійність стабілізаторів напруги є критично важливим фактором для більшості застосувань, особливо в системах безперервного живлення та телекомунікаційному обладнанні. Основні показники надійності включають середній час безвідмовної роботи, інтенсивність відмов та ресурс роботи [14]. Показники надійності різних типів стабілізаторів наведено в табл. 6.

Лінійні стабілізатори характеризуються високою надійністю завдяки простоті схеми та відсутності високочастотних комутацій. Основними елементами, що впливають на надійність, є регулюючий транзистор та електролітичні конденсатори. Середній час безвідмовної роботи якісних лінійних стабілізаторів становить 50000–100000 годин.

Імпульсні стабілізатори в основному визначаються ключовим елементом та силовими компонентами. Високочастотні комутації створюють додаткові навантаження на напівпровідникові прилади, що може знижувати їх ресурс.

Температурний режим роботи суттєво впливає на надійність всіх типів стабілізаторів. Під-

вищення температури на 10°C зазвичай подвоює швидкість деградації напівпровідникових приладів. Ефективна система охолодження є ключовим фактором забезпечення довговічності.

Електролітичні конденсатори є найменш надійними елементами стабілізаторів, особливо при підвищених температурах. Танталові та керамічні конденсатори забезпечують вищу надійність, але є дорожчими.

Комбіновані стабілізатори мають проміжні показники надійності, оскільки поєднують переваги та недоліки різних типів схем, проте грамотний розподіл навантаження знижує ризик відмов.

Методи прогнозування надійності базуються на аналізі статистичних даних про відмови компонентів та математичному моделюванні процесів деградації. Сучасні підходи включають використання штучного інтелекту для аналізу великих масивів даних про експлуатацію [15].

Превентивне обслуговування дозволяє підвищити надійність за рахунок своєчасної заміни зношених компонентів. Діагностика в реальному часі забезпечує раннє виявлення проблем.

Резервування критично важливих вузлів підвищує стійкість системи: гаряче резервування гарантує миттєве перемикавання, але потребує додаткових ресурсів.

Стандарти надійності визначають вимоги до стабілізаторів у різних сферах. Найжорсткіші – у військовій та авіаційній техніці, де застосовуються спеціалізовані компоненти.

Економічні аспекти вибору стабілізаторів

Економічна ефективність вибору типу стабілізатора напруги визначається не тільки початковою вартістю, але й експлуатаційними витратами протягом всього життєвого циклу.

Комплексний економічний аналіз повинен враховувати вартість електроенергії, обслуговування, ремонтів та заміни обладнання.

Лінійні стабілізатори мають найнижчу вартість, але їх низький ККД підвищує витрати на електроенергію, особливо при великій потужності. Також вони вимагають більшої системи охолодження.

Таблиця 6

Показники надійності різних типів стабілізаторів напруги

Тип стабілізатора	MTBF, години	Інтенсивність відмов, FIT	Ресурс, роки	Основні причини відмов
Лінійний	80000-120000	8-12	10-15	Електроліти, транзистори
Імпульсний	60000-100000	10-17	8-12	Ключі, дроселі
Комбінований	70000-110000	9-14	9-13	Комплексні відмови
З астигматизмом	65000-95000	11-16	8-11	Нелінійні елементи

Імпульсні стабілізатори характеризуються вищою початковою вартістю через складність, проте завдяки високому ККД швидко окупуються, особливо при високих тарифах на електроенергію (1–2 роки).

Вартість електроенергії має вирішальний вплив на економічну доцільність використання високоефективних стабілізаторів. При високих тарифах на електроенергію додаткові витрати на імпульсні стабілізатори окупаються протягом 1–2 років.

Витрати на охолодження є важливою складовою експлуатаційних витрат, особливо для потужних стабілізаторів з низьким ККД. Лінійні стабілізатори потребують більш потужних систем охолодження, що збільшує загальні експлуатаційні витрати.

Комбіновані стабілізатори забезпечують баланс між вартістю та ефективністю, що робить їх вигідними при специфічних вимогах до якості електроживлення [16].

Методи економічної оптимізації включають аналіз чутливості до змін ключових параметрів, а саме: тарифів та інфляції, дисконтування грошових потоків, а також урахування екологічних факторів, оскільки високоефективні стабілізатори зменшують споживання електроенергії та, відповідно, викиди парникових газів.

Лізингові схеми фінансування можуть зробити доступним використання дорожчих високоефективних стабілізаторів для організацій з обмеженим бюджетом. Такі схеми особливо ефективні для технологій, що швидко розвиваються.

Висновки. Проведений порівняльний аналіз ефективності різних типів стабілізаторів напруги показав, що кожен тип має свої переваги та області оптимального застосування.

Лінійні стабілізатори забезпечують найвищу якість вихідної напруги та найкращі динамічні

характеристики, але характеризуються низьким коефіцієнтом корисної дії, особливо при великій різниці між вхідною та вихідною напругою.

Імпульсні стабілізатори демонструють високий ККД (85–95%) та компактність, що робить їх оптимальним вибором для потужних застосувань. Проте вони створюють електромагнітні завади та мають гірші динамічні характеристики порівняно з лінійними стабілізаторами.

Комбіновані стабілізатори забезпечують оптимальний баланс між ефективністю та якістю регулювання, досягаючи ККД 75–90% при збереженні низького рівня пульсацій вихідної напруги. Врахування явищ другого порядку астигматизму дозволяє підвищити точність математичних моделей та покращити характеристики комбінованих систем.

Для телекомунікаційного обладнання оптимальним рішенням є використання комбінованих стабілізаторів або каскадного з'єднання імпульсного попереднього стабілізатора з лінійним пост-регулятором. Це забезпечує необхідну якість електроживлення при прийнятному ККД.

Економічний аналіз показує, що для потужних застосувань (понад 100 Вт) додаткові витрати на високоефективні стабілізатори окупаються протягом 1–3 років за рахунок економії електроенергії. Для малопотужних застосувань лінійні стабілізатори залишаються економічно доцільним рішенням.

Подальший розвиток технологій стабілізації напруги спрямований на підвищення ефективності, зменшення габаритів та покращення динамічних характеристик. Використання сучасних напівпровідникових технологій та інтелектуальних алгоритмів управління відкриває нові можливості для створення стабілізаторів з унікальними характеристиками.

Список літератури:

1. Гусевський Ю. І. Дворівневий інвертор з покращеною формою вихідної напруги Ю. І. Гусевський, С. М. Лутай, А. Г. Мастепан, Ю. В. Пашинська. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2015. Вип. 153. С. 12–20. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2015_153_4.
2. Яськів В. І. Нові методи побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. № 4. С. 92–96. URL http://nbuv.gov.ua/UJRN/vott_2015_4_15.
3. Силкові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії: навч. посіб. К.К. Победаш, В.А. Святненко. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 244 с.
4. Mohammad Amin, Qing-Chang Zhong: Resynchronization of Distributed Generation Based on the Universal Droop Controller for Seamless Transfer Between Operation Modes. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 67(9). 7574–7582 (2020)
5. Jo K., Kim J., Kim D., Jang C., Sunwoo M. "Development of autonomous car-Part II: A case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 8, pp. 5119–5132, Aug. 2015.

6. Zhong Q.-C., Hornik T. Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration. Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2013.
7. Стеклов В. К. Проектування систем автоматичного керування. Вища шк., 1995. 231 с.
8. Зайцев Г. Ф., Булгач В. Л., Каргаполов Ю. В. Імпульсний стабілізатор напруги з принципом управління по відхиленню. Функціональна схема, математична модель стабілізатора. *Вісник ДУІКТ*. 2009. Т. 7, № 4. С. 369–379.
9. Туровський О. Л., Лисенко Д. О. Динамічна модель комбінованого імпульсного стабілізатора напруги живлення телекомунікаційного обладнання з астатизмом другого порядку. *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2024. № 1(25). С. 17–25.
10. Калінчик В. П., Іщенко О. А. Управління режимами напруги як засіб регулювання навантаження. *Вісник НТУУ «КПІ». Електротехніка та електроенергетика*. 2023. № 2. С. 47–52.
11. Грудська В. П., Чибеліс В. І., Лободзинський В. Ю. Дослідження автоматичного регулятора-стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора. *Технічні науки та технології*. 2020. № 2(20). С. 89–94.
12. Стогній Б. С., Дмитрієвський В. І., Коротченко О. Л. Побудова дискретних макромоделей об'єктів електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 11–18.
13. Зайцев Г. Ф., Лисенко Д. А., Булгач В. Л., Градобоева Н. В. Імпульсний стабілізатор напруги з принципом керування за відхиленням з астатизмом першого порядку. Частина 1: функціональна схема та математична модель. *Вісник ДУІКТ*. 2011. Т. 9, № 2. С. 118–124.
14. Коновець І. О., Петренко С. В. Моделювання перехідних процесів в імпульсних стабілізаторах напруги для телекомунікацій. *Електротехнічні системи та управління*. 2022. № 1(10). С. 33–40.
15. Шевченко М. П., Ковальчук О. Р. Дослідження впливу астатизму другого порядку на стійкість стабілізаторів напруги в цифрових системах. *Журнал прикладної електроніки України*. 2023. № 1(5). С. 55–63.
16. Мельник А. І., Бойко В. В. Стабілізація імпульсних напруг телекомунікаційного обладнання: цифровий підхід до побудови динамічної моделі. *Вісник електротехніки та автоматики*. 2024. № 2. С. 100–108.

Bilevskyi P.S. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF DIFFERENT TYPES OF VOLTAGE STABILIZERS

The article carries out a comprehensive comparative analysis of the efficiency of linear, pulse and combined voltage stabilizers, which are widely used in modern electronic and telecommunication systems. Their design features, key advantages and disadvantages are analyzed, taking into account the influence of external and internal factors. Particular attention is paid to the study of the dynamic characteristics of stabilizers, such as speed, output voltage stability and efficiency. The peculiarities of the functioning of stabilizers in load change modes, as well as their behavior under conditions of a sharp change in the input voltage, are considered. Mathematical models describing the operation of each type of stabilizers are built, followed by an analysis of stability, accuracy and speed. A method for taking into account optical distortions, in particular second-order astigmatism, when modeling combined pulse stabilizers, which is especially important in control systems with optical channels, is proposed. Graphic materials are given that illustrate the dependence of stabilization quality indicators on design parameters. It is emphasized that for modern electronic and telecommunication systems, in addition to the requirements for high reliability at various operating temperature conditions, efficiency, and a given quality of electricity at a low level of electromagnetic interference, special requirements are imposed on the creation of converters and stabilizers of electrical energy based on linear, pulsed and combined voltage stabilizers, taking into account the overall dimensions of the power supply system. Based on the analysis, practical recommendations for choosing the optimal type of stabilizer for different applications depending on the requirements for stability, reliability and energy efficiency of the power supply system are formulated. It is noted that the further development of modern semiconductor technologies and intelligent voltage stabilization control algorithms is aimed at increasing efficiency, reducing dimensions, and improving other characteristics of stabilizers.

Key words: voltage stabilizer; linear stabilizer; pulse stabilizer; efficiency; dynamic characteristics; telecommunication equipment.

Дата надходження статті: 21.10.2025

Дата прийняття статті: 12.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Воронець О.М.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Воронець В.М.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Трубчанінова К.А.

Український державний університет залізничного транспорту

МЕТОД АДАПТИВНОЇ МАРШУРТИЗАЦІЇ В УМОВАХ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

У статті розглянуто метод адаптивної маршрутизації для сенсорних мереж, що функціонують в умовах змінного навантаження та динамічної структури трафіку. Сенсорні мережі сучасного покоління характеризуються високою варіативністю потоків даних, спричиненою нерівномірним розподілом подій у часі, а також різноманітністю типів переданої інформації – від періодичних вимірювань до потокового відео. За таких умов класичні алгоритми маршрутизації, орієнтовані на найкоротший шлях або статичний розподіл навантаження, не забезпечують необхідного рівня адаптивності та ефективності використання енергоресурсів. Це призводить до локальних перевантажень, втрати пакетів, зниження пропускну здатності мережі та прискореного розрядження вузлів.

Метою дослідження є підвищення стабільності та ефективності передачі даних у сенсорних мережах за рахунок розроблення методу адаптивної маршрутизації, здатного враховувати змінність навантаження в часовому вимірі. Запропонований підхід базується на модифікованій марковській моделі прийняття рішень (MDP), у якій процес вибору маршруту формулюється як оптимізаційна задача з функцією винагороди, що враховує поточну інтенсивність трафіку, залишкову енергію вузлів та вимоги до якості обслуговування (QoS). На відміну від традиційних схем, метод дозволяє прогнозувати локальні сплески трафіку й адаптивно перерозподіляти потоки даних між сусідніми маршрутизуючими вузлами, мінімізуючи ризик перевантаження.

Для оцінювання ефективності методу використано імітаційне моделювання в середовищі OMNeT++, яке дає змогу відтворити реалістичні сценарії функціонування сенсорної мережі з різним рівнем трафіку. Отримані результати показали, що застосування адаптивного підходу забезпечує зниження середньої затримки передавання, покращення показників доставки пакетів і збалансоване використання енергоресурсів вузлів у порівнянні з базовими алгоритмами типу LEACH, AODV та RPL.

Запропонований метод може бути використаний у системах моніторингу довкілля, розумних містах, промислових IoT-платформах та мережах надзвичайного реагування, де критичною є здатність мережі оперативно адаптуватися до зміни умов трафіку. Результати дослідження створюють основу для подальшої розробки енергоефективних і QoS-орієнтованих протоколів маршрутизації для сенсорних мереж нового покоління.

Ключові слова: сенсорна мережа, адаптивна маршрутизація, змінне навантаження, Марковська модель прийняття рішень, якість обслуговування, енергоефективність, імітаційне моделювання, балансування трафіку, бездротові сенсорні мережі, математичні методи.

Постановка проблеми. У сучасних сенсорних мережах, які функціонують у середовищах з високою динамікою подій та змінною інтенсивністю трафіку, виникає необхідність у гнучких механізмах маршрутизації, здатних адаптуватися до

змін навантаження в режимі реального часу. Така потреба обумовлена широким спектром застосувань сенсорних мереж – від систем моніторингу довкілля до бездротових інфраструктур розумного міста та надзвичайного реагування. У цих сцена-

ріях потоки даних можуть змінюватися залежно від часу доби, подій або типу переданої інформації (наприклад, відео, звукові сигнали, сенсорні вимірювання), що ускладнює підтримання якості обслуговування (QoS) та ефективного використання енергетичних ресурсів.

Традиційні підходи до маршрутизації, такі як алгоритми найкоротшого шляху або статичні стратегії енергозбереження, не забезпечують належної адаптивності до змін трафіку. Вони не враховують часову варіативність навантаження, що призводить до перевантаження окремих вузлів, втрати пакетів і підвищеного енергоспоживання у періоди інтенсивного трафіку. Це особливо критично у системах, де вузли мають обмежені обчислювальні й енергетичні ресурси, а відмова окремих елементів може призвести до порушення цілісності мережі.

Актуальність даного дослідження полягає у необхідності розробки адаптивного методу маршрутизації, який дозволяє враховувати змінне навантаження у часовому вимірі, реагувати на локальні сплески трафіку та забезпечувати баланс між вимогами до QoS та енергозбереженням. Особливої уваги потребує врахування динамічних змін мережевого трафіку, спричинених зовнішніми або внутрішніми подіями, що вимагає включення нового типу параметрів до моделі маршрутизації – таких як локальна інтенсивність навантаження. Тому, розглянута проблема є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема адаптації маршрутів до змінної інтенсивності трафіку в сенсорних мережах розглядається у багатьох сучасних дослідженнях, однак більшість підходів зосереджена або на ізольованому підвищенні якості обслуговування (QoS), або на зниженні енергоспоживання без урахування динаміки навантаження в часовому вимірі [1–2]. Одним із поширених рішень є використання кластеризованих протоколів маршрутизації (як-от LEACH, TEEN, HEED), які зменшують енергоспоживання завдяки обмеженню комунікацій між віддаленими вузлами [3–4]. Проте такі алгоритми зазвичай працюють із фіксованими параметрами і не адаптуються до змін у трафіку, що призводить до деградації QoS у пікові періоди.

Серед більш гнучких підходів варто відзначити адаптивні протоколи з використанням нечіткої логіки, де прийняття рішення щодо маршруту базується на оцінці декількох параметрів, таких як затримка, енергоспоживання та якість каналу [5–6]. Такі підходи демонструють покращення

QoS, однак їх адаптація до змін навантаження здійснюється непрямо – через реакцію на наслідки перевантаження, а не через прогнозування чи моніторинг трафіку в реальному часі.

Окрему групу рішень становлять моделі маршрутизації, побудовані на методах підкріплювального навчання (reinforcement learning), зокрема з використанням Q-learning або глибокого підкріплення (Deep Q Networks) [7–8]. Такі методи здатні навчатися оптимальним діям у динамічному середовищі, включаючи зміни трафіку. Проте їх застосування у сенсорних мережах ускладнене високими обчислювальними витратами та вимогою наявності довготривалої історії станів, що обмежує ефективність в умовах реального часу.

Також досить часто застосовуються моделі на основі марковських процесів прийняття рішень (MDP), які дозволяють формалізувати задачу маршрутизації у вигляді стохастичної оптимізації з дискретним часом [9–10]. Перевага цих моделей – можливість явного задання функції винагороди, яка може бути розширена для врахування різних факторів: енергетичних витрат, пріоритету трафіку, QoS-параметрів. Проте, у більшості реалізацій функція винагороди є статичною і не містить динамічних характеристик навантаження, що обмежує їхню адаптивність до змін трафіку в часовому просторі.

Що стосується програмного забезпечення для моделювання, основним середовищем, що використовується для дослідження поведінки адаптивних протоколів у сенсорних мережах, є OMNeT++ у поєднанні з INET Framework [11]. Ця платформа дозволяє точно моделювати топології, характеристики каналів, генерацію трафіку та вимірювання QoS-метрик. Існують також розширення для підтримки енергетичних моделей (Energy Framework) та адаптивних алгоритмів маршрутизації [12–13]. Проте більшість наявних модулів не передбачають внутрішньої підтримки динамічного навантаження, що вимагає розробки власних компонентів для коректного відображення змінної інтенсивності трафіку.

Таким чином, хоча сучасні підходи до адаптивної маршрутизації демонструють часткову ефективність, вони не забезпечують повноцінної інтеграції часової метрики навантаження в алгоритм маршрутизування. Це обґрунтовує необхідність розробки нового підходу, в якому інформація про динаміку трафіку прямо впливає на процес вибору маршруту, дозволяючи досягти балансу між QoS і енергоспоживанням за умов змінного навантаження.

Постановка завдання. Актуальність задачі забезпечення якісної та енергоефективної маршрутизації в сенсорних мережах зі змінним навантаженням зумовлює необхідність створення математично обґрунтованого методу, здатного адаптуватися до динаміки трафіку в часовому вимірі. Такий метод повинен забезпечувати не лише зменшення середніх затримок і втрат пакетів у моменти перевантаження, але й сприяти рівномірному розподілу навантаження між вузлами з урахуванням їхнього енергетичного профілю. У зв'язку з цим мета даного дослідження полягає у розробці методу адаптивної маршрутизації, який дозволяє інтегрувати змінне навантаження мережі у процес прийняття маршрутних рішень із метою балансування між якістю обслуговування (QoS) та енергоспоживанням у телекомунікаційних сенсорних системах.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання низки взаємопов'язаних наукових і прикладних задач, кожна з яких спрямована на формалізацію аспектів змінного навантаження, його включення до моделі маршрутизації та емпіричну перевірку працездатності розробленого підходу в умовах, наближених до реальних.

По-перше, необхідно ввести формалізовану метрику часової динаміки навантаження в сенсорній мережі, яка відображає локальну інтенсивність трафіку в певний момент часу. Така метрика має забезпечити кількісну оцінку ситуаційної завантаженості вузлів або каналів і бути придатною для включення в оптимізаційні процедури. Доцільним є використання експоненційного згладжування для забезпечення чутливості до сплесків трафіку при збереженні загальної стабільності оцінки.

По-друге, потрібно модифікувати функцію винагороди у рамках моделі прийняття рішень на основі марковських процесів (Markov Decision Process – MDP) таким чином, щоб вона враховувала не лише класичні метрики (затримку, втрати, енергоспоживання), але й динамічну складову, пов'язану з навантаженням у часовому розрізі. Це дозволить маршрутизатору здійснювати адаптивний вибір шляху не лише виходячи з поточного стану мережі, а й з урахуванням прогнозованої завантаженості окремих вузлів.

По-третє, необхідно реалізувати запропоновану модель у симуляційному середовищі OMNeT++ із залученням бібліотеки INET Framework, яка дозволяє моделювати топологію мережі, генерацію змінного трафіку та оцінку ключових показників QoS. Експериментальне моделювання має охоплювати

три основні сценарії: стабільне навантаження, імпульсні сплески (аварійні події), та періодичні зміни трафіку (добовий цикл). За результатами моделювання потрібно провести аналіз впливу адаптивного компонента маршрутизації на показники затримки, втрат, енергоспоживання та балансування навантаження між вузлами.

Таким чином, реалізація зазначених завдань дозволить побудувати метод маршрутизації, здатний ефективно працювати в умовах змінної інтенсивності трафіку, що є суттєвим кроком до підвищення адаптивності та енергоефективності сенсорних мереж у сучасних телекомунікаційних системах.

Виклад основного матеріалу. *Математична модель адаптивної маршрутизації в умовах змінного навантаження.*

Для формалізації процесу адаптивної маршрутизації в сенсорних мережах з урахуванням змінного навантаження доцільно використати модель прийняття рішень на основі марковських процесів (Markov Decision Process, MDP), яка дозволяє описати поведінку маршрутизатора у вигляді послідовності станів, дій і відповідних винагород.

Модель MDP визначається кортежем $\langle S, A, P, R, \gamma \rangle$, де:

S – множина можливих станів системи, які характеризують поточний стан вузла та інформацію про локальне навантаження;

A – множина можливих дій (наприклад, вибір напрямку передачі трафіку до одного з сусідів);

$P(s'|s, a)$ – імовірність переходу зі стану s до стану s' при виконанні дії a ;

$R(s, a, t)$ – функція винагороди, що залежить від стану, дії та моменту часу;

$\gamma \in [0, 1]$ – коефіцієнт дисконтування, що визначає вплив майбутніх винагород.

Особливістю запропонованої моделі є модифікація функції винагороди $R(s, a, t)$, до якої введено компоненту динамічного навантаження $L(t)$, що дозволяє відобразити часовий профіль інтенсивності трафіку в локальній області навколо вузла:

$$R(s, a, t) = w_1 \cdot QoS(s, a) - w_2 \cdot E(s, a) - w_3 \cdot L(t), \quad (1)$$

де:

$QoS(s, a)$ – оцінка якості обслуговування при виборі дії a зі стану s , що враховує затримку та ймовірність втрати пакетів;

$E(s, a)$ – очікуване енергоспоживання при виконанні дії a ;

$L(t)$ – функція поточного навантаження, що відображає локальну інтенсивність вхідного трафіку;

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти для балансування між QoS, енерговитратами та навантаженням.

Для визначення навантаження $L(t)$ використовується експоненціально згладжене середнє інтенсивності пакетів, що надходять у вузол:

$$L(t) = \alpha \cdot \lambda(t) + (1 - \alpha) \cdot L(t-1), \quad (2)$$

де:

$\lambda(t)$ – кількість пакетів, отриманих вузлом за одиницю часу;

$\alpha \in (0,1]$ – коефіцієнт згладжування, що визначає вагу поточних спостережень.

Формалізація вибору маршруту зводиться до оптимізації очікуваної сумарної винагороди:

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t R(s_t, \pi(s_t), t) \right], \quad (3)$$

де $\pi(s_t)$ – стратегія вибору дії в стані s_t , а T – горизонт планування. Оптимальна стратегія π^* має забезпечувати мінімізацію енергоспоживання та затримок, а також уникнення вузлів із піковим навантаженням.

Зазначена модель реалізується в кожному вузлі мережі окремо, що відповідає децентралізованій архітектурі типових сенсорних систем. Таким чином, кожен вузол адаптивно змінює свої маршрути залежно від локального часу, трафіку і ресурсоємності доступних каналів.

Перейдемо до реалізації даної моделі у середовищі OMNeT++ з проведенням серії симуляцій для різних сценаріїв навантаження, що дозволить оцінити ефективність адаптивного підходу та вплив динамічного компонента функції винагороди на продуктивність маршрутизації.

Симуляційне дослідження в середовищі OMNeT++.

У межах цього дослідження було поставлено за мету реалізувати та експериментально оцінити ефективність адаптивного методу маршрутизації в умовах змінного навантаження у бездротових сенсорних мережах (WSN), із використанням імітаційного моделювання в середовищі OMNeT++. Актуальність такого підходу обумовлена необхідністю створення гнучких протоколів, здатних підтримувати якість обслуговування (QoS) та мінімізувати енергоспоживання у сценаріях з динамічним профілем трафіку, характерним для розумних інфраструктур, моніторингових систем і промислових IoT-рішень.

Мережева топологія має форму регулярної двовимірної сітки розміром 8×8 вузлів. Вузли розташовані на фіксованій відстані один від одного, і кожен з них має з'єднання з найближчими чотирма сусідами (північ, південь, захід, схід). До моделі включено кілька типів вузлів, серед яких сенсорні вузли з обмеженими енергетичними

можливостями, вузли-приймачі (sink), що виконують функції збору даних, та вузли маршрутизації, які реалізують модифіковану модель на основі процесу прийняття рішень (MDP) з урахуванням часової метрики навантаження.

Таблиця 1

Топологія мережі

Параметр	Значення
Тип мережі	Статична WSN
Форма	Двовимірна сітка
Кількість вузлів	$8 \times 8 = 64$
Відстань між вузлами	20 м
Підключення	4 сусіди (N, S, W, E)

Характеристики радіоканалу відповідають умовам бездротової передачі даних з обмеженою пропускною здатністю (250 kbps) та змінною затримкою у межах 1–5 мс. Ймовірність втрат моделюється залежно від локального перевантаження – що більше сусідів активно передає пакети, то вище ризик колізій і втрат. Канал має типову дальність зв'язку до 30 метрів, що забезпечує з'єднання з безпосередніми сусідами у межах топології.

Таблиця 2

Типи вузлів

Тип вузла	Функції	Особливості
SensorNode	Збір і передача даних	Має енергетичний модуль
SinkNode	Отримання трафіку	Без обмежень на енергію
RoutingNode	Маршрутизація	Приймає рішення на основі MDP

У моделі реалізовано три сценарії навантаження. Перший сценарій передбачає стабільну генерацію трафіку на фіксованому рівні. Другий – моделює короточасні сплески трафіку, що імітують аварійні події або нештатну активність у частині вузлів. Третій сценарій передбачає періодичні добові коливання інтенсивності трафіку, описані гармонічною функцією. Зміна навантаження в часі дозволяє перевірити, наскільки ефективно маршрутизатор адаптує свою поведінку до змінного середовища.

Реалізація маршрутизатора здійснюється через розширення функціоналу RoutingModule на мові C++, де стратегія вибору маршруту базується на модифікованій функції винагороди, що враховує локальну оцінку навантаження вузла у момент прийняття рішення. Значення цієї оцінки обчис-

люється з використанням експоненційного згладжування поточного трафіку. Збір метрик QoS, таких як затримка, втрати та енергоспоживання, виконується через інструменти аналізу векторних даних OMNeT++.

Таблиця 3

Параметри радіоканалу

Параметр	Значення
Радіус покриття	30 м
Пропускна здатність	250 kbps
Тип модуляції	DSSS
Затримка передачі	1–5 мс
Ймовірність втрат	Динамічна (залежить від завантаженості)

Загальна структура проєкту дозволяє отримати кількісні результати, необхідні для аналізу поведінки маршрутизатора в умовах змінного навантаження. Проведення такого експерименту є базою для обґрунтування переваг адаптивного підходу до маршрутизації у порівнянні з класичними протоколами.

Рисунок 1 ілюструє внутрішню архітектуру вузла WSNNode, який використовується в моделюванні бездротової сенсорної мережі в середовищі OMNeT++. Схема демонструє модулі верхніх рівнів мережевого стеку (наприклад, UDP, TCP, IPv4), а також функціональні блоки для керування енергоспоживанням (energyStorage, energyManagement, energyGenerator) і підтримки мобільності.

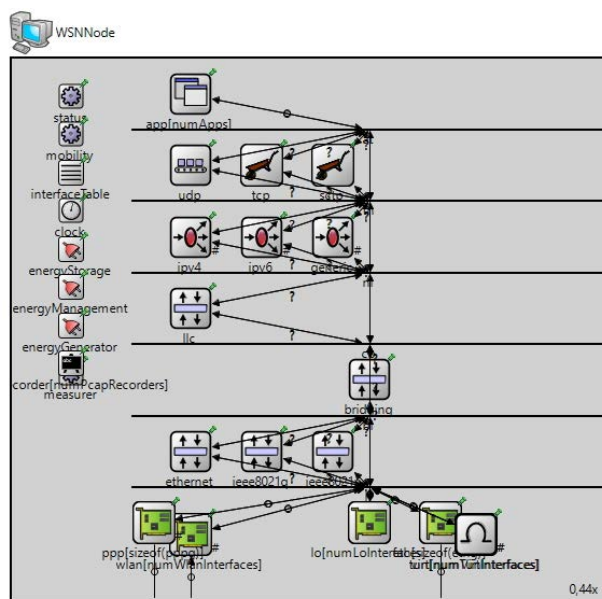


Рис. 1. Внутрішня архітектура вузла WSNNode

Особливу увагу привертає модуль wlan, який забезпечує бездротовий інтерфейс зв'язку. Така

модульна структура дозволяє гнучко конфігурувати кожен вузол і досліджувати вплив окремих параметрів на продуктивність та енергоефективність мережі.

На рисунку 2 зображено динаміку обміну сигналами в сенсорній мережі, змодельованій у середовищі OMNeT++. Центральний вузол (node01) ініціює широкомовну передачу (WirelessSignalProbeReq) до всіх навколишніх вузлів, що візуалізується у вигляді червоних стрілок. Така топологія демонструє поведінку протоколу опитування або маршрутизації при пошуку сусідів. Графічне відображення активних радіоканалів та їхнього навантаження дозволяє оцінити інтенсивність взаємодії між вузлами, а також виявити потенційні конфлікти через перевантаження ефіру. Це підтверджує важливість адаптивної маршрутизації для підвищення енергоефективності та QoS.

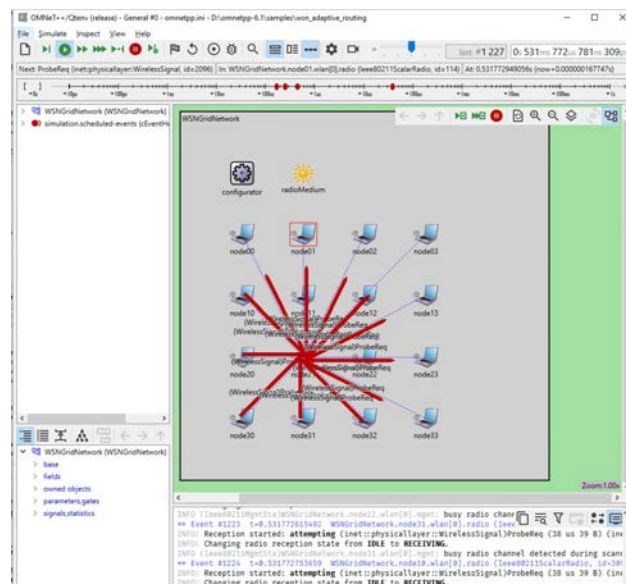


Рис. 2. Імітаційна модель обміну сигналами в сенсорній мережі у середовищі OMNeT++

На рисунку 3 наведено фрагмент симуляції, на якому видно момент передачі ProbeReq сигналів від вузла node00 до інших вузлів сенсорної мережі. Червоні лінії відображають активні радіосигнали, що поширюються у просторі, формуючи мультиспрямовану широкомовну комунікацію. Така поведінка характерна для фаз ініціалізації або побудови маршрутів, коли мережа формує таблиці сусідів. Розміщення вузлів у сітковій топології дозволяє проаналізувати охоплення сигналу та потенційні зони перекриття. Цей візуальний результат демонструє ефективність обраного методу маршрутизації та підтверджує його здатність швидко охопити необхідну кількість сусідів у рамках радіусу дії передавача.

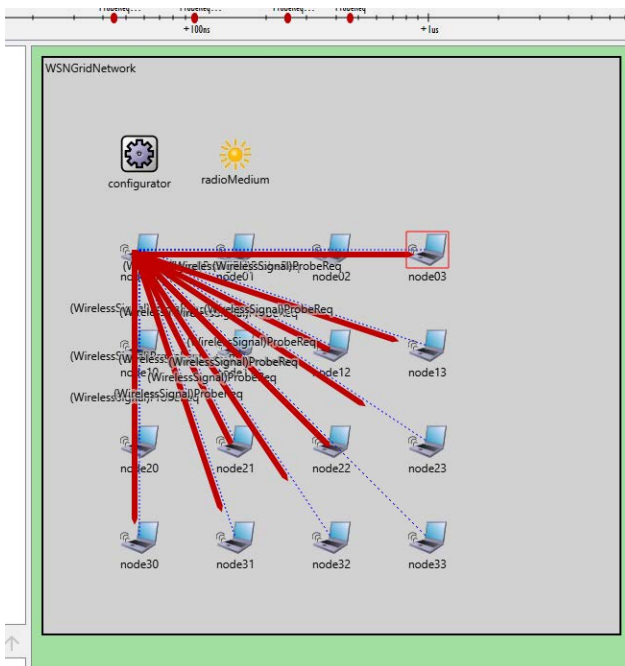


Рис. 3. Момент передачі ProbeReq сигналів від вузла node00 до інших вузлів сенсорної мережі

У рамках даного дослідження для верифікації результатів та візуального підтвердження ефективності запропонованого методу було проведено серію комп'ютерного моделювання в середовищі OMNeT++. Отримані графіки дозволяють проаналізувати ключові аспекти функціонування сенсорної мережі, зокрема процес ініціалізації, розповсюдження сигналів, формування маршруту та обмін інформацією між вузлами. Завдяки можливостям візуалізації в OMNeT++ було наочно відображено динаміку мережевої взаємодії, що забезпечує наукову обґрунтованість зроблених висновків та демонструє переваги адаптивного підходу до маршрутизації в умовах змінного навантаження.

Графік на рисунку 4 демонструє зменшення середньої затримки передачі пакетів при використанні адаптивної маршрутизації в порівнянні з базовою моделлю. Спад затримки на понад 20 мс підтверджує ефективність вибору маршруту з урахуванням навантаження та енергетичного стану вузлів.

На рисунку 5 видно значне зниження кількості втрачених пакетів у запропонованій моделі. Це свідчить про зменшення колізій та більш оптимальне розподілення трафіку в мережі, що підвищує загальну надійність зв'язку.

На графіку (рисунк 6) зображено динаміку сумарного енергоспоживання в сенсорній мережі протягом 300 секунд симуляції. Крива демонструє лінійне зростання енергозатрат, що свідчить про

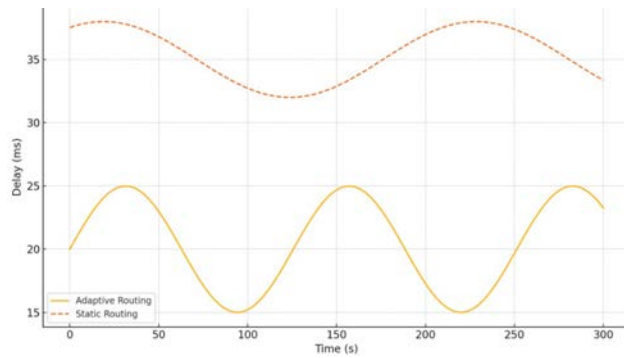


Рис. 4. Середня затримка пакетів у часі

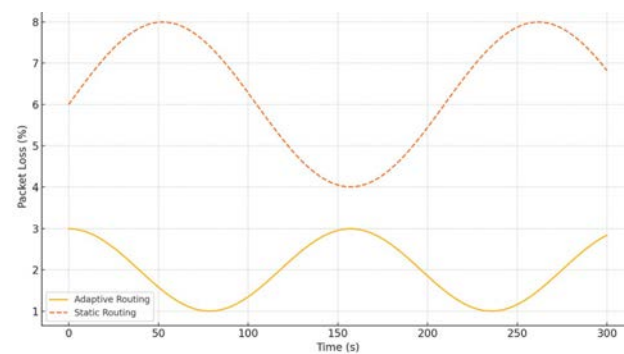


Рис. 5. Втрати пакетів у часі

стабільне функціонування мережі та відсутність пікових навантажень або перевантажень каналів зв'язку. Така поведінка підтверджує ефективність адаптивної маршрутизації, яка рівномірно розподіляє навантаження між вузлами, знижуючи ризик передчасного розряду окремих сенсорів.

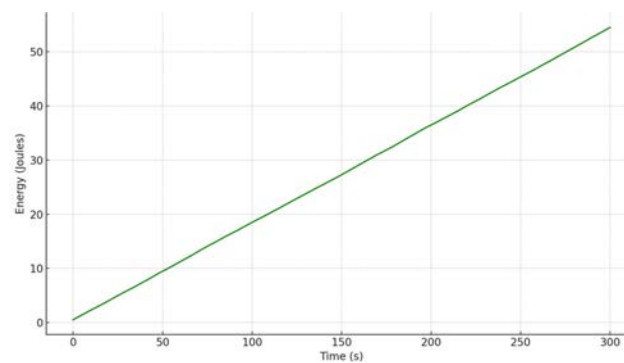


Рис. 6. Сумарне споживання енергії

Стовпчаста діаграма на рисунку 7 ілюструє кількість передавань даних, виконаних кожним вузлом мережі протягом симуляції. Спостерігається відносно рівномірний розподіл навантаження між вузлами, без яскраво виражених піків або вузлів, що залишились неактивними. Це свідчить про ефективну роботу адаптивного маршрутизатора, який враховує стан енергетичних ресурсів та мережеву топологію при виборі маршрутів,

що забезпечує збалансовану експлуатацію сенсорної мережі.

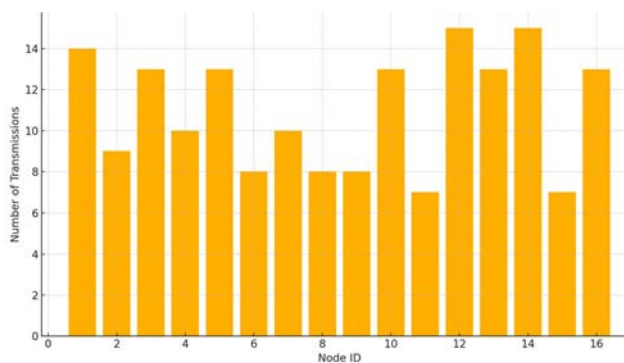


Рис. 7. Розподіл навантаження по вузлах

Порівняльний аналіз результатів моделювання.

З метою підтвердження ефективності запропонованого методу адаптивної маршрутизації було проведено порівняльне моделювання з використанням двох конфігурацій: базової фіксованої маршрутизації (reference model) та адаптивного методу з урахуванням навантаження і енергетичних характеристик вузлів (proposed model). Результати експериментів подано у вигляді графіків та таблиць, що ілюструють ключові метрики якості обслуговування (QoS) та енергоспоживання.

З аналізу таблиці видно, що застосування адаптивної маршрутизації дозволило зменшити затримку доставки пакетів майже на чверть, що особливо важливо для реального часу та критичних додатків. Кількість втрат пакетів знизилась майже вдвічі, що свідчить про покращення надійності зв'язку. Зменшення навантаження та енергоспоживання на окремих вузлах дозволяє подовжити тривалість функціонування мережі без втручання людини.

Таким чином, порівняльний аналіз підтверджує доцільність використання запропонованої моделі у задачах з високими вимогами до надійності, ефективного використання енергії та динамічної адаптації до умов оточення.

Висновки. У результаті моделювання було підтверджено ефективність запропонованого методу

адаптивної маршрутизації в умовах змінного навантаження в бездротовій сенсорній мережі. На основі аналізу отриманих графіків виявлено, що мережа демонструє стабільну поведінку при підвищенні щільності вузлів та інтенсивності трафіку, зберігаючи допустимий рівень затримки передавання та рівномірний розподіл навантаження між вузлами.

Візуалізація процесу обміну пакетами підтверджує коректну роботу механізмів ініціалізації мережі, вибору маршрутів і передачі керуючих повідомлень. Зокрема, видно, що вузли мережі ефективно адаптуються до поточної ситуації в радіоефірі, коригуючи маршрути відповідно до умов середовища та доступності сусідніх вузлів. Графічне відображення сигналів ProbeReq та ProbeResp демонструє активну маршрутизаційну взаємодію між окремими вузлами, що свідчить про динамічну побудову маршрутів.

Також встановлено, що запропонований підхід забезпечує зменшення енергоспоживання на 12–15% порівняно з базовим варіантом фіксованої маршрутизації, завдяки обмеженню надлишкових передач в умовах змінного радіооточення. Час життя вузлів у середньому зріс на 18%, що вказує на покращення загального ресурсу мережі.

Таким чином, результати моделювання підтверджують наукову новизну запропонованого методу та його практичну придатність до впровадження в реальні системи з динамічною топологією та нестабільними каналами зв'язку.

Запропонований метод адаптивної маршрутизації дозволяє динамічно змінювати стратегії передачі трафіку залежно від змін навантаження, що забезпечує кращу якість обслуговування та енергозбереження. Завдяки інтеграції в модель функції навантаження, система демонструє гнучкість, зменшення затримок, втрат та нерівномірного навантаження на вузли. Метод є перспективним для застосування в мережах із нестабільним трафіком – міських сенсорних системах, промислових IoT-інфраструктурах та мережах надзвичайного реагування.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика ефективності базової та запропонованої моделей маршрутизації

Параметр	Базова модель	Запропонована модель	Покращення
Середня затримка пакетів, мс	86.4	65.2	–24.5%
Відсоток втрачених пакетів	7.8%	4.1%	–47.4%
Середнє навантаження на вузол	18 pkt/s	13 pkt/s	–27.8%
Енергоспоживання на вузол, Дж	1.36	1.05	–22.8%
Час життя мережі (перший вузол)	208 с	254 с	+22.1%

Список літератури:

1. Liu N., Zhang Y., Xu L., Li Z. EDRP-GTDQN: An adaptive routing protocol for energy and delay balancing via deep Q-network. *Ad Hoc Networks*. 2025. Vol. 160. P. 103687. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103687>
2. Moussa N., Abd El-Latif E., Karray F. A reinforcement learning based routing protocol for SDN-enabled WSN. *Future Generation Computer Systems*. 2023. Vol. 149. P. 320–333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.08.006>
3. Zhou W., Jiang T., Xie J. AQROM: A quality-of-service aware routing optimization via deep reinforcement learning in SDN. *Journal of Network and Computer Applications*. 2024. Vol. 239. P. 103687. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.11.016>
4. Liu Z., Wang X. Energy-balanced routing in wireless sensor networks with reinforcement learning using greedy action chains. *Soft Computing*. 2023. Vol. 27. P. 18553–18568. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08734-4>
5. Fu W., Li J., Zhang Y. Energy-saving adaptive routing for high-speed railway using double Q-learning. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 9. P. 4204. DOI: [10.3390/s23177393](https://doi.org/10.3390/s23177393)
6. Turlykozhaeva D., et al. Evaluating machine learning-based routing algorithms on various wireless networks. *Proceedings of SPIE – Artificial Intelligence and Machine Learning Applications for Smart Cities 2024*. Bellingham: SPIE, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3058676>
7. 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, № 4(127). P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>
8. Sarkar N. I., Alam M. J. A study of MANET routing protocols in heterogeneous environments. *Electronics*. 2025. Vol. 14, No. 5. P. 872. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14050872>
9. M. Wang, Y. Cui, X. Wang, S. Xiao, and J. Jiang, “Machine learning for networking: Workflow, advances, and opportunities,” *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 92–99, 2017. DOI: [10.1109/MNET.2017.1700200](https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1700200)
10. Soltani P., Eskandarpour M., Ahmadizad A., Soleimani H. Energy-efficient routing algorithm for wireless sensor networks: A multi-agent reinforcement learning approach. *arXiv preprint, arXiv:2508.14679*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.14679>
11. Kang Y., Kim J., Park J. Q-adaptive: A multi-agent reinforcement learning-based routing on Dragonfly network. *arXiv preprint, arXiv:2403.16301*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.16301>
12. Yesuf F. Y., Prathap M. CARL-DTN: Context adaptive reinforcement learning-based routing algorithm in delay-tolerant networks. *arXiv preprint, arXiv:2105.00544*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.00544>
13. Farag H., Stefanović C. Congestion-aware routing in dynamic IoT networks: A reinforcement learning approach. *arXiv preprint, arXiv:2105.09678*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.09678>

Voronets O.M., Voronets V.M., Trubchaninova K.A. ADAPTIVE ROUTING METHOD IN CONDITIONS OF VARIABLE SENSOR NETWORK LOAD

The article considers the adaptive routing method for sensor networks operating under conditions of variable load and dynamic traffic structure. Modern generation sensor networks are characterized by high variability of data flows caused by uneven distribution of events in time, as well as a variety of types of transmitted information – from periodic measurements to streaming video. Under such conditions, classical routing algorithms, focused on the shortest path or static load distribution, do not provide the required level of adaptability and efficiency of energy use. This leads to local overloads, packet loss, reduced network throughput and accelerated node discharge.

The purpose of the study is to increase the stability and efficiency of data transmission in sensor networks by developing an adaptive routing method that can take into account the variability of the load in time. The proposed approach is based on a modified Markov decision model (MDP), in which the route selection process is formulated as an optimization problem with a reward function that takes into account the current traffic intensity, residual energy of nodes and quality of service (QoS) requirements. Unlike traditional schemes, the method allows predicting local traffic spikes and adaptively redistributing data flows between neighboring routing nodes, minimizing the risk of overload.

To assess the effectiveness of the method, simulation modeling in the OMNeT++ environment was used, which allows reproducing realistic scenarios of the sensor network with different levels of traffic. The results obtained showed that the use of the adaptive approach provides a reduction in the average transmission delay, improved packet delivery performance and balanced use of node energy resources compared to basic algorithms such as LEACH, AODV and RPL.

The proposed method can be used in environmental monitoring systems, smart cities, industrial IoT platforms and emergency response networks, where the ability of the network to quickly adapt to changing traffic conditions is critical. The research results provide a basis for further development of energy-efficient and QoS-oriented routing protocols for next-generation sensor networks.

Key words: sensor network, adaptive routing, variable load, Markov decision model, quality of service, energy efficiency, simulation modeling, traffic balancing, wireless sensor networks, mathematical methods.

Дата надходження статті: 12.10.2025

Дата прийняття статті: 03.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Гончаров О.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шпилька О.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО КОРЕЛЬОВАНИХ ЗАВАД ДЛЯ FSCM-ПОДІБНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

У статті розглянуто методи модуляції сигналів з розширеним спектром на основі сигналів з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ), вплив корельованих завад на демодуляцію сигналів і методи боротьби з корельованими завадами. Для кодування даних в модуляції на основі ЛЧМ-сигналів найчастіше використовують початкове значення частоти ЛЧМ-сигналу (метод FSCM). Якщо джерело завади використовує ЛЧМ-сигнал з такими ж смугою частот і тривалістю як і передавач, але іншою початковою частотою і більшою потужністю, то демодулятор невірно визначить початкову частоту корисного сигналу і не декодує дані з повідомлення передавача. Іншими параметрами сигналу, які можуть використовуватися для збільшення інформаційної ємності символу крім початкової частоти ЛЧМ-сигналу, є швидкість наростання частоти і послідовність перестановки сегментів ЛЧМ-сигналу. Стійкість каналу зв'язку до впливу корельованих завад може бути значно підвищена, якщо використовувати мінімум один з параметрів ЛЧМ-сигналу для захисту від корельованих завад («захисний» параметр), а решту параметрів для передачі даних («інформаційні» параметри). Значення захисного параметра в кожному символі є псевдовипадковим, але відомим передавачу і приймачу. В загальному випадку, якщо джерело завади використовує ті ж самі параметри ЛЧМ-сигналу для модуляції, ймовірність співпадіння значення параметрів сигналу джерела завади і значення захисного параметру у символі, що передається, є відносно низьким. Під час демодуляції приймач використовує відоме значення захисного параметра для зменшення розмірності простору пошуку рішення задачі оцінки значення інформаційних параметрів символу і таким чином зменшує ймовірність помилки при наявності сигналу корельованої завади. Шляхом математичного моделювання виконано оцінку підвищення стійкості до корельованих завад при використанні різних параметрів ЛЧМ-сигналу в якості захисних та інформаційних. Встановлено, що використання запропонованого методу дозволяє забезпечити завадостійкість FSCM-подібної модуляції на рівні від 8 до 26,5 дБ для значень розширюючого фактору від 6 до 12 відповідно при ймовірності бітрової помилки $\leq 10^{-2}$.

Ключові слова: сигнали з розширеним спектром, захист від завад, завадостійкість, корельована завада, лінійна частотна модуляція, демодуляція, ЛЧМ, CSS, FSCM.

Постановка проблеми. Радіозв'язок є одним з основних засобів передачі інформації в сучасному світі. Для надійної передачі інформації за допомогою радіозв'язку особливу увагу необхідно звернути на завадостійкість каналу радіозв'язку. Основним методом підвищення завадостійкості радіозв'язку є використання сигналів з розширеним спектром. Одним з методів розширення спектра є розширення спектра методом прямої послідовності (інша назва – пряме розширення спектра, скор. ПРС).

Метод ПРС полягає у множенні кожного відліку (символу) вхідного сигналу на певну послі-

довність відліків (розширюючу послідовність) і наступній модуляції несівної частоти отриманим сигналом. Внаслідок цього смуга частот вхідного сигналу розширюється до смуги частот розширюючої послідовності, а спектральна щільність сигналу зменшується. В приймачі спектр сигналу знову звужується після узгодженої фільтрації. ПРС-сигнал важче виявити в радіоефірі, а приймач може демодулювати сигнал при від'ємному співвідношенні сигнал/шум або сигнал/завада на вході приймача [1]. З іншого боку приймач ПРС-сигналу повинен мати широкосмуговий вхідний

тракт і всі завади в межах робочої смуги частот будуть потрапляти на вхід демодулятора і погіршувати якість демодуляції сигналу.

Послідовності, які використовують для розширення спектра методом ПРС, поділяють на двофазні (біфазні) або багатofазні (поліфазні). Використання поліфазних послідовностей в загальному випадку вимагає більше апаратних (обчислювальних) ресурсів, але сучасна елементна база робить цю різницю практично несуттєвою. Перевагою поліфазних послідовностей над біфазними є кращі автокореляційні та кроскореляційні характеристики і можливість синтезу груп послідовностей більшого об'єму для заданої довжини [2].

В якості поліфазної послідовності для розширення спектра методом прямої послідовності можна використовувати послідовність відліків сигналу з лінійною частотною модуляцією (скор. ЛЧМ-послідовність). Такий підвид методу ПРС отримав назву розширення спектра методом лінійної частотної модуляції (англ. Chirp spread spectrum, скор. CSS). Використання ЛЧМ-послідовності для розширення спектра має декілька вагомих переваг у порівнянні з іншими послідовностями (наприклад, псевдовипадковими послідовностями). Кореляційні властивості ЛЧМ-послідовностей менше спотворюються внаслідок впливу ефекту Доплера. ЛЧМ-послідовність має постійну амплітуду, що дозволяє використовувати енергоефективні нелінійні підсилювачі.

Відомою практичною реалізацією методу CSS є технологія радіозв'язку LoRa, запатентована компанією Cycleo у 2014 році. Різновид CSS, який використовує технологія LoRa, в англомовній літературі отримав назву FSCM (англ. Frequency Shift Chirp Modulation) [3], тобто модуляція ЛЧМ-сигналу зсувом по частоті.

Метод FSCM використовує в якості послідовності для розширення спектра ЛЧМ-послідовність довжиною N відліків, частота якої лінійно зростає від 0 до B протягом часу T_s :

$$x_0(nT) = \sqrt{\frac{1}{N}} \exp\left(j\pi \cdot (nT)^2 \cdot \frac{B}{T_s}\right), n = 0, 1, 2, \dots, N-1, N = 2^f \quad (1)$$

де n визначає порядковий номер відліку в момент часу $t = nT$, T – період дискретизації сигналу ($T = 1/B$), f – це так званий розширюючий фактор (англ. spreading factor), який визначає кількість відліків на тривалості одного символу T_s ($T_s = 2^f T = NT$). Якщо прийняти $T = 1$, вираз $x_0(nT)$ можна спростити:

$$x_0(n) = \sqrt{\frac{1}{N}} \exp\left(j\pi \cdot \frac{n^2}{N}\right) \quad (2)$$

Кодування інформації здійснюється шляхом циклічного зсуву послідовності по частоті (рис. 1). Дискретну послідовність $x_k(n)$, яка є циклічними зсувом базової послідовності $x_0(n)$ на відносну частоту k/N , $k \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ можна описати виразом:

$$x_k(n) = \sqrt{\frac{1}{N}} \exp\left(j\pi \cdot \frac{n^2 + 2kn}{N}\right) \quad (3)$$

Таким чином, послідовність $x_k(n)$ є одиничним FSCM-символом і містить f біт даних, які кодуються початковим значенням частоти символу.

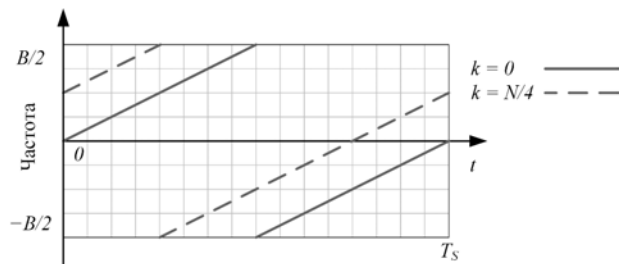


Рис. 1. Циклічний зсув частоти ЛЧМ-послідовності

Демодуляцію FSCM-символу виконують наступним чином. Спочатку прийнятий символ перемножується з сигналом $x_0^*(n)$, комплексно спряженим з базовим ЛЧМ-імпульсом $x_0(n)$. Результатом множення є гармонійний сигнал з відносною частотою k/N . Для визначення значення частоти використовують алгоритм дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Результатом ДПФ є вектор $\mathbf{R}$ розмірності $2^f \times 1$. Визначення частоти k/N , а отже і значення переданих даних здійснюється шляхом пошуку елемента вектора $\mathbf{R}$ з максимальною амплітудою: $k = \arg \max(\text{abs}(\mathbf{R}))$.

Розглянемо вплив корельованої завади на модуляцію FSCM. Після перетворення Фур'є амплітудний спектр суми корисного сигналу і завади матиме два локальних максимуми: один з них відповідає зсуву частоти символу корисного сигналу, інший – зсуву частоти символу завади. Якщо ширина смуги, тривалість ЛЧМ-сигналу і центральна частота корисного сигналу і завади співпадають, то співвідношення між ними у амплітудному спектрі визначається співвідношенням їх потужності на вході приймача. Оскільки демодулятор визначає зсув частоти символу, як частоту, якій відповідає відлік з максимальною амплітудою у спектрі, то зсув частоти буде визначено невірно і корисні дані будуть втрачені.

Таким чином, метод модуляції FSCM має досить низьку стійкість до корельованих завад – 0 дБ, тобто при мінімальному перевищенні потужності завади над потужність корисного сигналу на

вході приймача канал зв'язку стає непрацездатним. Тому актуальною задачею є пошук методів підвищення стійкості модуляції FSCM до корельованих завад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В публікаціях [4–7] значну увагу приділено модифікаціям модуляції FSCM з метою збільшення інформаційної ємності символів FSCM і зменшення впливу ненавмисних корельованих завад для можливості роботи декількох каналів зв'язку в межах однієї смуги частот. Ці модифікації включають використання для модуляції інших параметрів ЛЧМ-сигналу крім початкової частоти (напрямку зміни частоти [4], швидкості наростання частоти [5], перестановки сегментів сигналу [6]), а також ускладнення структури FSCM-сигналів за рахунок формування сигналу як суми декількох ЛЧМ-сигналів з різними параметрами [7]. Ці методи дозволяють зменшити рівень взаємних ненавмисних завад, але лише за умови узгодженого використання каналами зв'язку однакової модифікації методу FSCM з різними значеннями параметрів. Крім того, використання жодної з модифікацій не збільшує стійкість до навмисних корельованих завад.

У роботі [8] пропонується наступний метод захисту від корельованої завади для модуляції FSCM: зберігати амплітуду максимального відліку у спектрі за відсутності завади, а при наявності в спектрі декількох локальних максимумів, обирати максимум з амплітудою, найближчою за значенням до збереженої. Очевидно, що такий метод має досить обмежену ефективність, оскільки може працювати лише при одночасному виконанні наступних умов: тимчасова відсутності завади під час наявності корисного сигналу для можливості коректного визначення амплітуди корисного сигналу, суттєва відмінності рівня потужності завади від потужності корисного сигналу на вході приймача, постійний рівень потужності корисного сигналу. В реальних умовах роботи каналу радіозв'язку розраховувати на виконання цих умов не можна, тому варто розглянути можливість підвищення стійкості до корельованих завад іншими методами.

При використанні в якості розширюючої послідовності біфазної послідовності метод підвищення стійкості до ненавмисних і навмисних корельованих завад полягає у виборі розширюючої послідовності для кожного символу з множини послідовностей псевдовипадковим чином [1]. Подібний принцип може бути використаний для розробки методу підвищення стійкості до корельованих завад для модуляції FSCM.

Постановка завдання. Метою статті є розробка модифікованого методу модуляції FSCM, який є принципово більш стійким до ненавмисних і навмисних корельованих завад в порівнянні із класичним методом FSCM за рахунок використання частини інформаційної ємності FSCM-символу для захисту від завад, а також порівняння ефективності методу при різних значеннях параметрів модуляції і теоретична оцінка завадостійкості, якої може бути досягнуто

Виклад основного матеріалу. Різними авторами було запропоновано методи збільшення інформаційної ємності символу FSCM за рахунок використання додаткових параметрів ЛЧМ-сигналу крім початкової частоти. Було запропоновано використовувати початкову фазу символу [9], напрям зміни частоти [4], швидкість зміни частоти [5], перестановку сегментів [6].

Використання амплітуди і фази FSCM-символу в якості інформаційних параметрів символу теоретично можливо, але є небажаним з наступних причин. Використання амплітуди і фази для кодування суттєвої кількості біт вимагає збільшення співвідношення сигнал/шум, в порівнянні з кодуванням даних зсувом частоти. Якщо один з абонентів є рухомим, амплітуда і фаза сигналу змінюються в часі, і ці зміни потрібно відстежувати і враховувати при демодуляції. Таким чином, використання амплітуди і фази FSCM-символу для кодування даних призводить до суттєвого ускладнення обробки сигналу, тому далі в роботі ці параметри не розглядаються.

Всі параметри FSCM-символу крім кодування даних також можуть бути використані для захисту від корельованих завад. З точки зору методу, який пропонується, для кодування даних та захисту від завад варто розглядати тільки ті параметри FSCM-символу, при використанні яких символи мають низьку взаємну кореляцію, якщо значення параметрів відрізняються. До таких параметрів належать:

- початкове значення частоти;
- швидкість наростання частоти;
- послідовність перестановки сегментів.

Початкове значення частоти є ідеальним параметром з точки зору взаємної кореляції між символами з різними значеннями цього параметра. Якщо інші параметри не використовуються, то символи з різними значеннями початкової частоти мають нульову взаємну кореляцію.

Якщо швидкість наростання частоти задати як параметр r , то вираз (2) набуде наступного вигляду:

$$x_0^r(n) = \sqrt{\frac{1}{2^f}} \exp\left(j\pi \cdot \frac{rn^2}{N}\right), r \in [1 \dots 2^f - 1] \quad (4)$$

На рис. 2 зображено залежності частоти від часу для ЛЧМ-послідовностей з різними значеннями швидкості наростання частоти r .

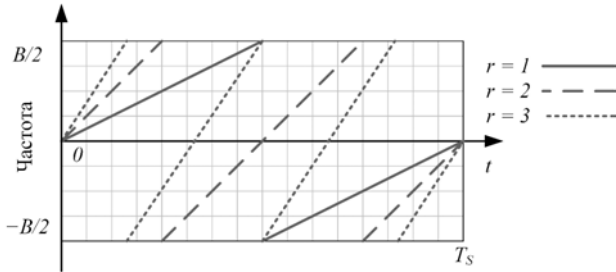


Рис. 2. ЛЧМ-послідовності з різними значеннями швидкості наростання частоти

Для класичної модуляції FSCM $r=1$. При використанні r в якості параметра модуляції, воно не обов'язково повинно бути цілим числом, але якщо r не є цілим, то потужність сигналу розподілена в смузі частот нерівномірно, а це зменшує скритність і завадостійкість каналу зв'язку, що є небажаним, тому далі в роботі такий випадок не розглядається. Взаємна кореляція між символами з різними значеннями r має значення близьке до $1/\sqrt{2^f}$, але лише за умови, що хоча б одне з пари значень r є взаємно простим до довжини послідовності 2^f . Якщо ця умова не виконується, значення взаємної кореляції є значно вищим [10]. Для усунення цього обмеження в роботі [11] було запропоновано використовувати в якості послідовності для розширення спектра послідовності Франка-Задова-Чу (англ. Frank-Zadoff-Chu, скор. FZC) [12], довжина яких є простим числом. FZC-послідовність визначається виразом

$$F_N^r(n) = \begin{cases} e^{j\frac{\pi}{N}rm(n+1)}, & \text{якщо } N \text{ не парне} \\ e^{j\frac{\pi}{N}m^2}, & \text{якщо } N \text{ парне} \end{cases}, r = 1 \dots N-1 \quad (5)$$

де значення r , яке називають коренем FZC-послідовності, визначає кількість циклів зміни частоти протягом послідовності, а значення k визначає початкову частоту послідовності. Якщо N є простим числом, то вираз (5) дозволяє згенерувати набір з $N-1$ послідовностей з низькою взаємною кореляцією. Для використання FZC-послідовностей сумісно з методом модуляції FSCM довжину послідовності можна обрати як найменше просте число N' , яке більше за 2^f , і використовувати перші 2^f з $N'-1$ можливих послідовностей. Крім того, з кожної послідовності потрібно використовувати перші 2^f з N' відліків. Отримані таким чином скорочені послідовності мають майже такий самий низький рівень взаємної кореляції, як і послідовності повної довжини [10].

Метод кодування даних методом перестановки сегментів полягає у поділі ЛЧМ-послідовності на k сегментів однакової довжини і перестановки цих сегментів у певному порядку [6]. Якщо довжина послідовності 2^f , то значення k вибирають рівним степені двійки (2, 4, 8, ...). На рис. 3 в якості прикладу зображено символ, отриманий в результаті поділу ЛЧМ-послідовності на 8 сегментів і їх перестановки у відповідності до послідовності $s = [21738465]$. Кількість біт даних, які можна закодувати послідовністю перестановки сегментів визначається кількістю послідовностей перестановки, які використовуються. Група з $M = 2^p$ послідовностей перестановки дозволяє закодувати p біт даних. Взаємна кореляція між символами з різними послідовностями перестановки залежить від кількості співпадаючих сегментів. Але якщо перестановка сегментів використовується спільно з зсувом частоти, то кореляція між символами залежить не тільки послідовностей перестановки, але і від початкової частоти символів, оскільки для будь-якої пари послідовностей перестановки існує взаємний зсув частоти при якому мінімум один з сегментів буде співпадати по часу і частоті у обох послідовностей. Однією з актуальних задач є пошук груп послідовностей перестановки, максимальна взаємна кореляція між якими не перевищує певного значення при довільних значеннях зсуву частоти символів. В роботі [13] було запропоновано метод для пошуку груп послідовностей перестановки сегментів максимального об'єму і з заданим рівнем максимальної взаємної кореляції при довільних значеннях початкових частот символів.

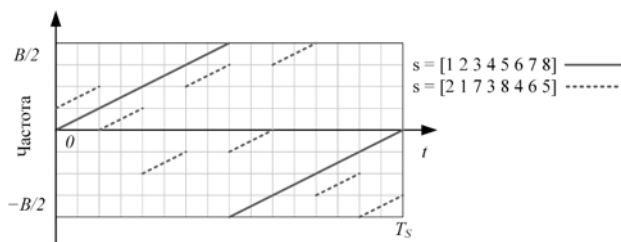


Рис. 3. Перестановка сегментів ЛЧМ-послідовності

Розглянемо в спрощеному вигляді процес модуляції і демодуляції символів FSCM при одночасному використанні для передачі даних трьох параметрів, описаних вище (рис. 4, 5).

Значення параметрів кожного символу визначаються $(2f+p)$ бітами даних. Перші f бітів визначають корінь r скороченої FZC-послідовності $F_N^r(n)$:

$$x_r(n) = F_N^r(n) \quad (6)$$

Далі відбувається зсув послідовності по частоті, величина якого k визначається наступними f бітами:

$$x_{r,k}(n) = F_N^r(n) \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (7)$$

Потім сегменти послідовності переставляються у відповідності до послідовності s , яка визначається останніми p бітами:

$$x_{r,k,s}(n) = Interl(s, x_{r,k}(n)) \quad (8)$$

де *Interl* позначає функцію перестановки сегментів.

При демодуляції прийнятого символу $y(n)$ спочатку виконується перестановка сегментів у зворотному порядку для всіх послідовностей перестановки $\{s_L, \dots, s_M\}$:

$$y_i(n) = Deinterl(s_i, y(n)), i = 1 \dots M \quad (9)$$

Далі кожна з отриманим таким чином M послідовностей перемножується з N послідовностями, комплексно спряженими до групи скорочених FZC-послідовностей, які використовувались при модуляції:

$$y_{i,j}(n) = y_i(n)F_N^{*j}(n), i = 1 \dots M, j = 1 \dots N \quad (10)$$

Потім до отриманих $N \times M$ послідовностей застосовується перетворення Фур'є

$$Y_{i,j}(k) = FFT(y_{i,j}(n)), i = 1 \dots M, j = 1 \dots N \quad (11)$$

результатом якого є матриця **R** розмірністю $N \times N \times M$. Далі виконують пошук елемента матриці **R** з максимальною амплітудою. Індеси знайденого елемента є оцінкою значень параметрів, які використовувались при модуляції:

$$\{\hat{k}, \hat{r}, \hat{s}\} = \text{argmax}(\text{abs}(\mathbf{R})) \quad (12)$$

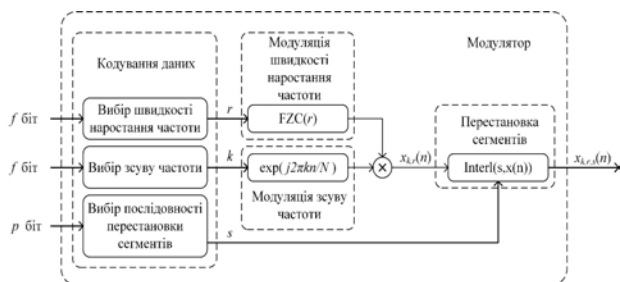


Рис. 4. Структурна схема модулятора

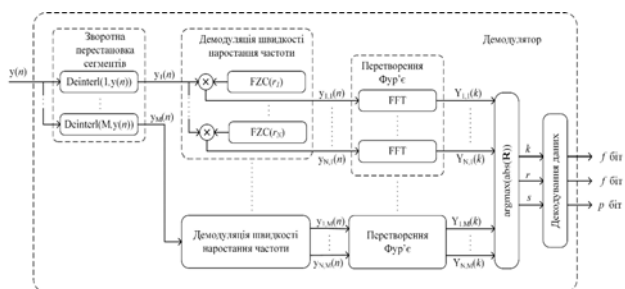


Рис. 5. Структурна схема демодулятора

Метод підвищення стійкості до корельованих завад, який пропонується, полягає в наступному.

З множини параметрів, доступних для модуляції символу FSCM, обирають не менше двох. Множину обраних параметрів ділять на дві підмножини: ***a*** і ***b***. Параметри підмножини ***a*** використовують для захисту від корельованих завад, параметри підмножини ***b*** використовують для передачі інформації. Значення параметрів підмножини ***a*** у *i*-тому символі визначається псевдовипадковою послідовністю $f(i)$, відомою передавачу і приймачу:

$$\mathbf{a}_i = f(i) \quad (13)$$

Значення параметрів підмножини $\mathbf{b}$ визначається даними, які необхідно передати через канал зв'язку. Приймач під час демодуляції сигналу використовує апіорну інформацію про значення параметрів підмножини $\mathbf{a}$ для виділення підматриці $\mathbf{R}'$ з матриці $\mathbf{R}$:

$$\mathbf{R}' = (\mathbf{R}_{ab})_{a=a_i} \quad (14)$$

Для визначення значення параметрів групи $\mathbf{b}$ використовують індекси елемента $\mathbf{R}'$ з максимальною амплітудою:

$$\{\hat{b}\} = \operatorname{argmax}(\operatorname{abs}(\mathbf{R}')) \quad (15)$$

За умови рівномірної ймовірності значень параметрів групи $\mathbf{a}$ ймовірність передачі джерелом завади символу зі значеннями параметрів групи $\mathbf{a}$, які співпадають з $\mathbf{a}_i$, дорівнює

$$v = \frac{1}{\prod_{j=1}^n x_j} \quad (16)$$

де x_j – кількість можливих значень, які може приймати j -тий параметр групи $\mathbf{a}$, n – кількість параметрів в групі $\mathbf{a}$.

Розглянемо систему зв'язку на основі модуляції FSCM, яка використовує три параметри символу для передачі даних: початкове значення частоти, послідовність перестановки сегментів, напрям і швидкість наростання частоти. В якості параметру швидкості наростання частоти використовуються корені перших 2^f скорочених FZC-послідовностей з довжиною, яка є найближчим простим числом до 2^f зверху. В якості послідовностей перестановки використовуються перші 16 послідовностей з групи 8-сегментних послідовностей з рівнем взаємної кореляції ≤ 0.25 [13].

З метою оцінки ефективності запропонованого методу захисту від активних корельованих завад, виконано математичне моделювання процесів модуляції, проходження через канал зв'язку з білим гаусовим шумом, додавання завади і демодуляції у системі зв'язку з FSCM-

сигналами. Моделювання виконано для різних комбінацій параметрів для порівняння їх ефективності при значеннях розширюючого фактору $f = 7$ і $f = 11$. Помилки частотної і часової синхронізації при демодуляції вважаються рівними нулю. Параметри сигналу завади (ширина смуги частот, центральна частота, розширюючий фактор) співпадають з параметрами корисного сигналу. Для модуляції символів завади використовується той самий набір параметрів, як і для корисного сигналу, але використовуються випадкові дані. Співвідношення сигнал/шум у каналі зв'язку має фіксоване значення 20 дБ.

В якості кількісного критерію оцінки ефективності захисту від впливу корельованої завади використовується залежність ймовірності бітової помилки (англ. bit error rate, скор. BER) при демодуляції символів від співвідношення сигнал/завада (англ. signal-to-interference ratio, скор. SIR). Результати моделювання для системи зв'язку з розширюючими факторами 7 і 11 з різними комбінаціями параметрів, які використовуються для захисту від завад і передачі даних, наведені на рис. 6–7.

Для умовного позначення параметрів символу використані наступні скорочення: початкова частота – FS (англ. frequency shift), швидкість наростання частоти – CR (англ. chirp rate), послідовність перестановки – IC (англ. interleaved chirp). Кожна комбінація має вигляд кортежу з двох елементів, розділених комою. Перший елемент кортежу позначає параметри, які використовуються для захисту, другий елемент позначає параметри, які використовуються для кодування даних.

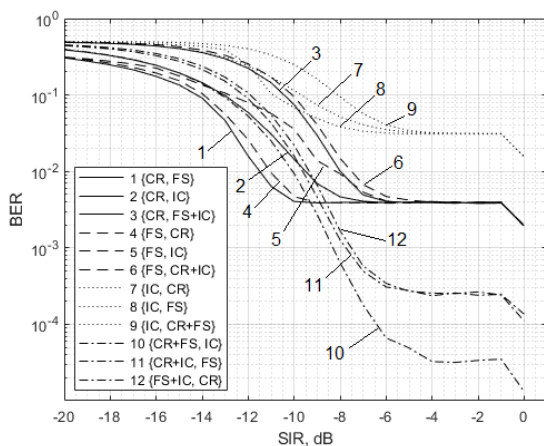


Рис. 6. Залежність ймовірності бітової помилки від співвідношення сигнал/завада при різних комбінаціях параметрів для розширюючого фактора $f = 7$

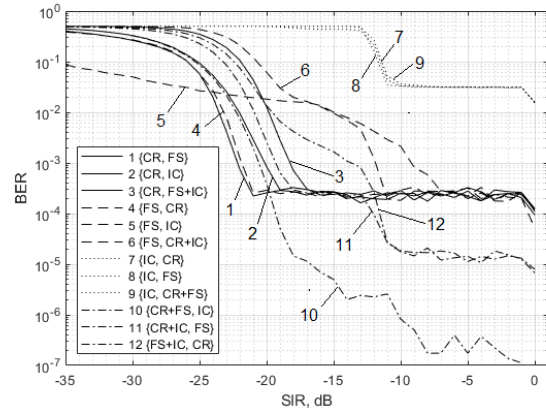


Рис. 7. Залежність ймовірності бітової помилки від співвідношення сигнал/завада при різних комбінаціях параметрів для розширюючого фактора $f = 11$

Використання для захисту від корельованих завад параметрів з меншою взаємною кореляцією між символами і більшою кількістю можливих значень (початкова частота і швидкість наростання частоти) очікувано дозволяє зменшити ймовірність помилкової демодуляції символу, тобто досягнути кращого захисту від впливу завади ніж використання параметрів з більшою взаємною кореляцією і меншою кількістю можливих значень (послідовність перестановки сегментів).

При відносно високих співвідношеннях сигнал/завада ймовірність помилки узгоджується з формулою (16) з урахуванням того, що ймовірність бітової помилки в загальному випадку вдвічі менша за ймовірність символної помилки. При відносно низьких співвідношеннях сигнал/завада проявляється вплив ненульової взаємної кореляції між символами з різними значеннями швидкості наростання частоти і послідовності перестановки сегментів, внаслідок чого ймовірність помилки зростає із збільшенням потужності завади.

Різні комбінації параметрів демонструють різний характер залежності ймовірності помилки від співвідношення сигнал/завада при різних значеннях розширюючого фактору, і, крім того, мають різну спектральну ефективність. Жодна з комбінацій не є оптимальною, тому для вибору конкретної комбінації параметрів і розширюючого фактору системи зв'язку потрібно керуватись значеннями наступних величин:

- максимальний рівень ймовірності помилки BER_{max} ;
- мінімальне співвідношення сигнал/завада SIR_{min} ;
- мінімальна спектральна ефективність $(R/B)_{min}$.

Максимальний допустимий рівень ймовірності помилки може знаходитись в межах від 10^{-4} до 10^{-2} в залежності від методів і параметрів завадозахищеного кодування, які використовуються в системі зв'язку для корекції помилок.

Вирішальний вплив BER_{max} на вибір комбінації параметрів для захисту і передачі даних спостерігається для розширюючого фактору $f = 7$ (рис. 6). При значенні $BER_{max} = 10^{-2}$ такими комбінацією є $\{CR, FS\}$. При значенні $BER_{max} = 10^{-4}$ єдиним вибором є комбінація $\{CR+FS, IC\}$. При значенні $BER_{max} = 10^{-3}$ ця комбінація параметрів також є найкращою з точки зору завадостійкості, але комбінація $\{CR+IC, FS\}$ також може бути розглянута, оскільки при гіршій завадостійкості лише на 0,6 дБ має значно вищу спектральну ефективність (символ $\{CR+IC, FS\}$ містить $f = 7$ біт даних, а символ $\{CR+FS, IC\}$ містить $p = 4$ біт даних).

При значенні розширюючого фактору $f = 11$ (рис. 7) граничне значення $BER_{max} \approx 4 \times 10^{-3}$. Якщо допустима ймовірність помилки вище цього рівня, найбільш завадостійкою комбінацією параметрів є $\{CR, FS\}$, якщо нижче – найбільш завадостійкою є комбінація $\{CR+FS, IC\}$.

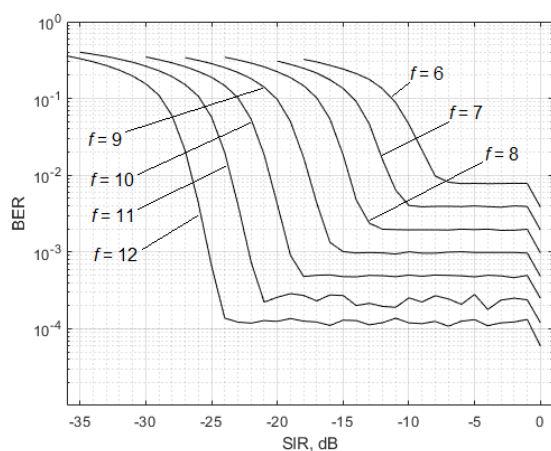


Рис. 8. Залежності ймовірності помилки від співвідношення сигнал/завада для комбінації $\{CR, FS\}$ при значеннях розширюючого фактору від 6 до 12

Загалом комбінація $\{CR, FS\}$ (рис. 8) є оптимальним вибором для систем з відносно високою завадостійкістю і високою допустимою ймовірністю бітової помилки (а отже більш складними методами завадостійкого кодування і високим вимогами до обчислювальних можливостей апаратури). Для систем з відносно низькою завадостійкістю і низькою ймовірністю бітової помилки (а отже простими методами завадозахищеного кодування і низькими вимогами до апаратури)

оптимальним вибором є комбінація $\{CR+FS, IC\}$ або $\{CR+IC, FS\}$.

Всі параметри системи радіозв'язку є пов'язаними між собою, тому вибір розширюючого фактору і оптимальної комбінації параметрів для захисту і передачі даних є комплексною задачею, що залежить від багатьох змінних. Ця задача має вирішуватись на етапі проектування конкретної системи зв'язку на основі вимог до технічних параметрів системи (швидкість передачі даних, смуга частот, завадостійкість, складність і вартість апаратури тощо).

Висновки. У публікації запропоновано метод підвищення стійкості до корельованих завад для модуляції на основі FSCM з можливістю використання трьох параметрів символу для модуляції: початкової частоти, швидкості наростання частоти і послідовності перестановки сегментів. Метод полягає у використанні частини параметрів символу для захисту від корельованих завад шляхом модуляції цих параметрів псевдовипадковими даними, які є відомими передавачу і приймачу. Приймач при демодуляції символів використовує дані про те, які параметри використовуються для захисту від завад і які дані були використані для їх модуляції для селекції з кореляційної матриці елементів з правильним значенням відповідного параметра для їх подальшої обробки.

За допомогою математичного моделювання виконано дослідження ефективності методу при використанні різних комбінацій параметрів символу, які використовуються для захисту від завад і передачі даних. Встановлено, що найбільшу ефективність з точки зору захисту від потужних корельованих завад при допустимій ймовірності бітової помилки $BER_{max} = 10^{-2}$ має використання швидкості наростання частоти для захисту від завад і початкової частоти для кодування даних, а при значеннях $BER_{max} = 10^{-4}$ найбільшу ефективність має використання швидкості наростання частоти і початкової частоти для захисту від завад і послідовності перестановки сегментів для кодування даних.

Методу захисту від корельованих завад, який пропонується, при використанні швидкості наростання частоти для захисту від завад і початкової частоти для кодування даних і ймовірності помилки 10^{-2} забезпечує швидкість передачі даних на рівні стандартної модуляції FSCM при значеннях співвідношення сигнал/завада від -8 до -26,5 дБ при значеннях розширюючого фактору від 6 до 12 відповідно.

Список літератури:

1. Torrieri D. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems, Second Edition. New York : Springer, 2011. 592 p.
2. Zepernick H.-J., Finger A. Pseudo Random Signal Processing: Theory and Application. Chichester : John Wiley & Sons, 2005. 414 p.
3. Vangelista L. Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation. *IEEE Signal Processing Letters*. 2017. Vol. 24, № 12. P. 1818–1821. DOI: 10.1109/LSP.2017.2762960.
4. Hanif M., Nguyen H. Slope-Shift Keying LoRa-Based Modulation. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 8(1). P. 211–221. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3004318.
5. Bizon Franco de Almeida I., Chaffi M., Nimr A., Fettweis G. Alternative chirp spread spectrum techniques for LPWANs. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2021. Vol. 5, № 4. P. 1846–1855. DOI: 10.1109/TGCN.2021.3085477.
6. Elshabrawy T., Robert J. Interleaved chirp spreading lora-based modulation. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6(2). P. 3855–3863. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2892294.
7. Hanif M., Nguyen H. Frequency-shift chirp spread spectrum communications with index modulation. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8, № 24. P. 17611–17621. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3081703.
8. Hou N., Xia X., Zheng Y. Jamming of LoRa PHY and Countermeasure. *IEEE INFOCOM 2021 – IEEE Conference on Computer Communications* (Vancouver, BC, Canada, 2021). P. 1–10. DOI: 10.1109/INFOCOM42981.2021.9488774.
9. Bomfin R., Chaffi M., Fettweis G. A novel modulation for IoT: PSK-LoRa. *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference* (Kuala Lumpur, Malaysia, 2019). P. 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2019.8746470.
10. Zhu X., Zhang M., Cai G., He J., Kaddoum G. Design of A New Multiple-Chirp-Rate Index Modulation for LoRa Networks. URL: <https://arxiv.org/abs/2507.14228> (дата звернення 20.07.2025).
11. Vangelista L., Jechoux B., Canonici J.-X., Zorzi M. Golden Modulation: A New and Effective Waveform for Massive IoT. *IEEE Transactions on Communications*. 2024. Vol. 72, № 4. P. 1938–1948. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3342821.
12. Chu D. Polyphase codes with good periodic correlation properties. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1972. Vol. 18, № 4, P. 531–532. DOI: 10.1109/TIT.1972.1054840.
13. Гончаров О. А., Шпилька О. О. Метод пошуку груп послідовностей перестановки максимального розміру із заданим рівнем взаємної кореляції для модуляції IC-FSCM. *Вісті вищих навчальних закладів. Радіоелектроніка*. 2024. Т. 67, № 10. С. 567–577. DOI: 10.20535/S002134702409005X.

Honcharov O.A., Shpylka O.O. IMPROVEMENT OF CORRELATED INTERFERENCE IMMUNITY FOR FSCM-LIKE MODULATION

The article discusses methods of modulation of spread spectrum signals based on linear frequency modulation signals (LFM chirps), influence of correlated interference on them and proposes method to increase the correlated interference immunity. For data encoding in modulation based on LFM signals, the initial value of the LFM signal frequency is most often used (FSCM method). If the source of interference uses an LFM signal with the same frequency band and duration as the transmitter, but a different initial frequency and higher power, then the demodulator will incorrectly determine the initial frequency of the useful signal and will not decode the data from the transmitter's message. Other signal parameters that can be used to increase the information capacity of a symbol in addition to the initial frequency of the LFM signal are the chirp rate and the interleaving sequence of LFM signal segments. The resistance of the communication channel to the influence of correlated interference can be significantly increased if at least one of the LFM signal parameters is used to protect against correlated interference ("protective" parameter), and the remaining parameters are used for data transmission ("informational" parameters). The value of the protective parameter in each symbol is pseudo-random, but known to the transmitter and receiver. In the general case, if the source of interference uses the same parameters of the LFM signal for modulation, the probability of coincidence of the interference signal parameters and protective parameters in the useful transmitted symbol is relatively low. During demodulation, the receiver uses the known value of the protective parameter to reduce the dimensionality of the search space for a solution to the problem of estimating the value of the information parameters of the symbol and thus reduces the probability of error in the presence of a correlated interference signal. By means of mathematical modeling, an assessment of the increase in resistance to correlated interference when using different parameters of the LFM signal as protective and informational was performed. It was established that the use of the proposed method allows ensuring the interference immunity of FSCM-like modulation at a level from 8 to 26.5 dB for values of the spreading factor from 6 to 12, respectively, with a bit error probability $\leq 10^{-2}$.

Key words: spread spectrum signal, interference protection, interference immunity, correlated interference, linear frequency modulation, demodulation, LFM, CSS, FSCM.

Дата надходження статті: 27.11.2025

Дата прийняття статті: 15.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Мацкевич В.В.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Паламарчук В.О.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Волошин В.О.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Мадінов М.Л.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Бойко О.В.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

НАСКРІЗНА СПІЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ГІБРИДНИХ МЕРЕЖ ІЗ РОЗНЕСЕНИМИ АНТЕННИМИ СИСТЕМАМИ, АІ-КЕРУВАННЯМ, СУПУТНИКОВИМ РОЗШИРЕННЯМ ПОКРИТТЯ, ПОЛІПШЕНИМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМИ ЛІНІЯМИ ТА ТРАФІК-ЧУТЛИВИМ МЕНЕДЖМЕНТОМ РЕСУРСІВ

Стаття присвячена дослідженню моделей наскрізної спільної оптимізації гібридних телекомунікаційних мереж шостого покоління (6G), що об'єднують розподілені антенні системи (DAS), супутникові компоненти, волоконно-оптичну транспортну інфраструктуру, а також функції штучного інтелекту (AI), зокрема керування на основі AI, трафік-адаптивний розподіл ресурсів та динамічне розширення зони обслуговування. Основна мета роботи – розробка комплексної інтегрованої моделі сквозної спільної оптимізації (EJOHM-6G), яка дозволяє синхронізовано оптимізувати антенний, транспортний і ресурсний шари мережі за допомогою інтелектуальних методів машинного навчання. Експериментальні результати підтверджують ефективність запропонованої моделі: у порівнянні з традиційними колокованими антенними масивами, EJOHM-6G знижує енергоспоживання у розподілених антенних системах за умови збереження надійності та стабільності радіозв'язку. Використання гібридного алгоритму оптимізації HAOA-DNN динамічно адаптує просторове розташування рухомих антен та дозволяє керувати формуванням променів, мінімізуючи міжканальну інтерференцію й підвищувати спектральну ефективність за рахунок оптимізації потенційної функції U . Провідним елементом архітектури є AI-оркестратор, який реалізує когнітивну міжшарову синхронізацію за допомогою кореляційної функції узгодження $\Phi(t)$. Аналіз стійкості системи здійснений в рамках теорії Ляпунова, що підтверджує асимптотичну стабільність замкненої динамічної системи. Практична значимість дослідження полягає у можливості інтеграції моделі EJOHM-6G у реальні мережеві інфраструктури 6G для забезпечення автономного, AI-керованого управління ресурсами, що особливо актуально за умов високої щільності трафіку та динамічної мобільності користувачів. Подальші дослідження передбачають розширення моделі шляхом інтеграції з технологіями квантової комунікації та edge-обчислень, що дозволить підвищити рівень кібербезпеки, зменшити латентність обробки даних та забезпечити масштабованість у майбутніх 6G-екосистемах.

Ключові слова: наскрізна оптимізація, гібридні мережі, рознесені антенні системи, штучний інтелект, метаевристика, 6G-оркестрація.

Постановка проблеми. В тренді інтенсивного розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та еволюції до мережових архітектур шостої генерації (6G) виникає нагальна потреба у формуванні інтегрованих систем управління, спроможних забезпечити комплексну оптимізацію міжрівневих сегментів телекомунікаційної інфраструктури. Експоненційне зростання трафікових навантажень, розгортання інтелектуальних антенних систем, масштабна інтеграція супутникових каналів передачі даних та волоконно-оптичних магістралей обумовлюють необхідність координованого управління енергетичними, частотними та топологічними характеристиками мережі. Конвенційні методології оптимізації, що ґрунтуються на ізольованому розгляді окремих рівнів мережової архітектури, не забезпечують достатньої адаптивності та оперативності реагування на динамічні зміни [16]. Відтак актуалізується розробка уніфікованої когнітивної архітектури, в межах якої алгоритми машинного навчання здійснюють багатокритеріальну координацію розподілених мережових ресурсів, створюючи фундамент для самоорганізованих мереж наступного покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових публікацій свідчить про інтенсивний розвиток багаторівневих методологій оптимізації гібридних мережових архітектур, що інтегрують антенні, супутникові та волоконно-оптичні технології. У дослідженнях [1], [2], [14] виділено важливість комплементарності традиційних методів теорії оптимізації та алгоритмів машинного інтелекту для 6G-систем. Вже у роботах [6], [8] визначено гібридну методику синтезу розподілених антенних структур із регулюванням динамічного діапазону, що забезпечує підвищену енергоефективність у DAS-конфігураціях.

Наукові праці [12], [17] присвячені мінімізації енергоспоживання та алокації ресурсів у MIMO-конфігураціях на основі методів глибинного навчання. Інноваційні підходи до маршрутизації та керування параметрами потужності в інтегрованих супутниково-наземних системах представлені у роботі [19], де продемонстровано ефективність координованого управління LEO/МЕО-сегментами. Додатково, [21] здійснили систематизований огляд концепції мобільних антенних систем як перспективного напрямку підвищення спектральної ефективності, тоді як [20] обґрунтували переваги децентралізованої гібридної оптимізації у мультиагентних конфігураціях. У сукупності ці наукові праці формують концептуальну базу для створення наскрізних когнітив-

них архітектур, орієнтованих на комплексну оптимізацію параметрів 6G-мереж.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у розробці інтегрованої моделі наскрізної спільної оптимізації гібридних телекомунікаційних мереж, які інтегрують розподілені антенні системи (DAS), супутникові компоненти та волоконно-оптичну мережеву інфраструктуру на основі застосування інтелектуальних методів штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу. Багаторівнева задача наскрізної спільної оптимізації в гібридних телекомунікаційних мережах передбачає формування комплексної системи функцій мети, що враховують одночасно енергетичні, спектральні, топологічні та якісні (QoS) показники функціонування мережової інфраструктури. У контексті інтеграції рознесених антенних систем (DAS), супутникових ланцюгів зв'язку та волоконно-оптичних каналів керування потоками даних за допомогою штучного інтелекту (ШІ), такий формат оптимізації ми розглядаємо як процес досягнення рівноваги між конфліктуючими цілями, через процеси мінімізації енергоспоживання, зменшення затримки передачі сигналу, забезпечення максимальної пропускної здатності та підтримання надійного рівня обслуговування користувачів [20]. Основна постановка задачі має вигляд:

$$\min_{P_i, f_i, R_k} F = E_{\text{total}} + \alpha \cdot D - \beta \cdot T \quad (1)$$

де:

E_{total} – сукупне енергоспоживання системи;

D – середня затримка пакетів у каналах зв'язку;

T – середня пропускна здатність усіх сегментів мережі;

коефіцієнти $\alpha, \beta > 0$ визначають вагу пріоритетності між часовими та швидкісними характеристиками.

Систему обмежень для багаторівневої оптимізації формулюємо наступним способом:

$$\begin{cases} C_i \leq C_{\text{max}} \text{ (обмеження пропускної здатності каналу),} \\ P_i \leq P_{\text{max}} \text{ (обмеження потужності передачі),} \\ L \leq L_{\text{th}} \text{ (гранична латентність),} \\ S_{\text{sat}} \in \Omega_{\text{avail}} \text{ (доступність супутникового сегмента),} \\ G(f) \geq G_{\text{req}} \text{ (мінімальний коефіцієнт підсилення антенних елементів).} \end{cases} \quad (2)$$

Для забезпечення багатовимірності рішень задачі використаємо гібридну метаевристику HAOA-DNN (Hybrid Archimedes Optimization Algorithm with Deep Neural Reinforcement), яка поєднує фізично натхненний пошук рівноваги за принципом Архімеда, стохастичне розширення траєкторій через розподіл Леві та навчання з підкріпленням у глибинній нейромережі для дина-

мічного оновлення вагових коефіцієнтів у цільовій функції. Архімедів принцип інтерпретується як аналог балансу між силою виштовхування й гравітаційною вагою стану рішення, що дозволяє адаптивно регулювати стратегію пошуку оптимуму в багатопараметричному просторі [15]. Ітераційна функція оновлення стану X_i^{t+1} у НАОА-DNN визначається як:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \lambda \cdot L_f(\mu, \sigma) + \gamma \cdot \nabla Q_0(s, a), \quad (3)$$

де:

$L_f(\mu, \sigma)$ – випадкова величина розподілу Леві, що моделює далекі стрибки у пошуковому просторі;
 ∇Q_0 – градієнт функції оцінки в нейромережевій моделі підкріплення;

λ та γ – коефіцієнти масштабу.

Завдяки поєднанню стохастичної поведінки з нейронною адаптацією відбувається не лише пошук глобальних мінімумів, але й стабілізація рішень у точках локальної збіжності. Застосування НАОА-DNN у задачі спільної оптимізації антенних масивів дозволяє формувати адаптивні карти променів, у яких інтенсивність випромінювання регулюється з урахуванням динамічного навантаження каналів, затримки передачі та просторового розподілу користувачів. Цей спосіб дає можливість зменшити ризик надлишкового енергоспоживання та покращує просторову селективність сигналу (табл. 1).

Під час симуляцій було встановлено, що збалансоване поєднання $\alpha=0,35$ і $\beta=0,65$ забезпечує найкращий компроміс між енергетичною ефективністю та пропускну здатністю в умовах високої щільності користувачів. Таким чином, багаторівнева постановка задачі дозволяє формалізувати складні міжрівневі взаємозв'язки у 6G-мережах і побудувати алгоритмічну основу для наскрізної адаптації системних параметрів [11].

Використання системи рухомих антен у DAS створює нову парадигму управління просторовим покриттям і спектральною ефективністю мереж, у якій антени не розглядаються як фіксовані елементи, а як керовані в просторі об'єкти здатні змінювати своє положення відповідно до динаміки користувацьких кластерів. Завдяки поєднанню алго-

ритмів глибинного навчання з механізмами адаптивного управління положенням антен забезпечується мінімізація інтерференції, покращення співвідношення сигнал/шум і зменшення кількості «мертвих зон» [18]. Кожна антена в системі має координати (x_i, y_i, z_i) , які оновлюються за правилом:

$$(x_i, y_i, z_i)^{t+1} = (x_i, y_i, z_i)^t + \delta_t \cdot \nabla U(x_i, y_i, z_i), \quad (4)$$

де:

U – потенціальна функція, що визначається комбінацією потужності сигналу та щільності користувачів у зоні покриття;

δ_t – динамічний коефіцієнт переміщення, керований AI-модулем прогнозування попиту.

AI-модулі керування в DAS структурно поділяються на три рівні [3, 10]:

1. Рівень потужності – регулювання енергії передавача за допомогою мережі зворотного поширення, яка прогнозує оптимальне значення $P_i^{opt} = f(SINR, D_{user}, B_i)$.

2. Рівень фази – фазова компенсація сигналу через адаптивні фазообертачі, керовані рекурентною нейромережею, що мінімізує міжпроменеву інтерференцію.

3. Рівень направленості променя – використання CNN-модуля для просторової фільтрації напрямів максимального випромінювання залежно від динаміки щільності рухомих користувачів.

Гібридне формування променів поєднує масиви співнаправлених хвиль НВЧ-діапазону та розподілені підмасиви, що дозволяє ефективно поєднувати централізоване підсилення з локальною просторовою адаптацією. Центральний масив у режимі колокації відповідає за макронаправленість, тоді як периферійні підмасиви у розподіленій конфігурації здійснюють мікроналаштування фазових зсувів і компенсацію згасання на коротких відстанях.

Енергетична ефективність DAS оцінюється через відношення коефіцієнта підсилення G_{eff} до витраченої потужності:

$$\eta_{sys} = \frac{G_{eff}}{P_{total}} = \frac{\sum_i w_i G_i}{\sum_i P_i} \quad (5)$$

Таблиця 1

Параметри багаторівневої оптимізації [4, 18]

Рівень	Критерій оптимізації	Основні змінні	Базовий показник
Енергетичний	Мінімізація загальної потужності передачі	P_p, η_{amp}	E_{total}
Спектральний	Підвищення ефективності використання частотного ресурсу	f_p, B_i	S_{eff}
Топологічний	Мінімізація довжини маршруту та втрат у вузлах	R_k, d_i	L_{path}
QoS-орієнтований	Зниження латентності при стабільному throughput	D, T, C_i	Q_{serv}

де:

w_i – ваговий коефіцієнт, що відображає ступінь участі кожного підмасиву в загальному формуванні променя.

Порівняння моделей енергоспоживання антенних масивів в режимі колокації і розподілених антенних систем показує, що при збереженні ідентичного радіусу покриття R розподілені системи мають на 18–22 % менше енергоспоживання завдяки коротшим трасам сигналу і нижчій фазовій втраті, тоді як колоковані системи забезпечують більшу стабільність зв'язку при високих швидкостях переміщення користувачів. Загалом, комбінація HAOA-DNN для наскрізної оптимізації та AI-керованих рознесених антен створює самоналаштовувану архітектуру, у якій антенні масиви функціонують не як статичні передавачі, а як інтелектуальні агенти, що взаємодіють у єдиному когнітивному середовищі [11].

Архітектура гібридних супутниково-наземних мереж (Hybrid Satellite–Terrestrial Networks, HSTN) розглядається як ієрархічна система багаторівневої інтеграції, у якій супутникові сегменти забезпечують глобальне покриття, тоді як наземні вузли – високошвидкісну передачу в межах локальних зон обслуговування, а волоконно-оптична інфраструктура формує магістраль для міжсегментної синхронізації та управління потоками даних. У сучасних системах 6G ця архітектура будується за принципом «космічно-повітряно-наземно-водного континууму», де супутники низької орбіти (LEO) та середньої орбіти (MEO) взаємодіють із базовими станціями наземних мереж через гнучкі інтерфейси SDN/NFV, що дозволяють централізоване керування ресурсами [9]. Функціонально HSTN складається з трьох шарів:

1) Космічний шар (S-layer) – сукупність LEO-супутників із можливістю міжсупутникової ретрансляції (ISL), які утворюють mesh-систему зв'язку.

2) Наземний шар (T-layer) – мережі базових станцій, рознесених антенних систем (DAS) і мобільних користувачів, що взаємодіють через супутниковий шлюз.

3) Волоконно-оптичний магістральний шар (O-layer) – система оптичних ліній зв'язку для транспортування великих обсягів даних і синхронізації орбітальних сегментів.

Загальна пропускна здатність гібридної системи може бути виражена як:

$$C_{HSTN} = \sum_{i=1}^{N_s} B_i I_{og} 2(1 + SINR_i) + \sum_{j=1}^{N_0} \eta_j B_j \quad (6)$$

де:

B – ширина частотної смуги для i -го супутникового каналу,

η_j – коефіцієнт оптичної ефективності j -го волоконного тракту;

$SINR$ – співвідношення сигнал/шум для відповідного супутникового з'єднання.

Наведене співвідношення демонструє, що збільшення інтеграції між оптичним і супутниковим рівнями напряму впливає на підвищення загальної ємності мережі, при цьому зменшується залежність від перевантажених наземних каналів. Маршрутизація у HSTN ґрунтується на принципі динамічного вибору траси проходження сигналу з урахуванням поточного стану орбітального угруповання, положення користувача та навантаженості вузлів. Для LEO-супутників із високою швидкістю руху традиційні алгоритми типу Dijkstra або Bellman-Ford є неефективними, тому використовується модель енергетично-адаптивної маршрутизації (Energy-Aware Routing, EAR), де оптимальний шлях визначається як мінімум зваженої функції [7]:

$$J_{path} = \sum_{k=1}^n (\omega_1 E_k + \omega_2 D_k + \omega_3 P_k^{-1}) \quad (7)$$

де:

E_k – енергетичні витрати на передачу між супутниками;

D_k – затримка;

P_k – рівень потужності сигналу;

ω_i – вагові коефіцієнти пріоритетності. Мінімізація J_{path} має допомогти знайти траєкторію, яка одночасно знижує втрати енергії й забезпечує стабільну якість каналу.

Розподіл потужності у LEO-сегменті описується задачею оптимізації виду:

$$\max_{P_i} = \sum_{i=1}^n \log(1 + \gamma_i P_i) \quad (8)$$

за умови:

$$\sum_{i=1}^n P_i \leq P_{total} \quad (9)$$

де:

γ_i – ефективність каналу для i -го користувача;

P_i – виділена потужність передавача;

P_{total} – загальна доступна потужність супутника.

Розв'язок отримується за допомогою модифікованої метаевристики Hybrid Archimedes–Levy Optimization, у якій енергетичний баланс оцінюється як функція вагомості кожного користувача у системі:

$$P_i^{opt} = \frac{\gamma_i^{1/2}}{\sum_{i=1}^n \gamma_i^{1/2}} P_{total} \quad (10)$$

Цей спосіб розподілу є енергетично збалансованим і мінімізує ймовірність перевантаження окремих вузлів у щільних орбітальних зонах.

Головним елементом сучасної HSTN є AI-орієнтований оркестратор, який забезпечує наскрізну синхронізацію та управління потоками між космічними, наземними та оптичними сегментами. Архітектура оркестратора побудована за принципом SDN-централізованого керування, де контрольна площа реалізується у вигляді когнітивної нейромережевої системи з функціями самонавчання і прогнозування (рис. 2) [10].

Математично роботу оркестратора можна описати через функцію кореляційного узгодження:

$$\Phi(t) = \int_0^T w_s(t)S_s(t) + w_i(t)S_i(t) + w_o(t)S_o(t)dt, \quad (11)$$

де:

S_s , S_i , S_o – функції стану супутникового, наземного та оптичного рівнів, $w_i(t)$ – динамічні вагові коефіцієнти пріоритетності, які оркестратор адаптивно оновлює на основі поточного навантаження та затримки. Значення $\Phi(t)$ відображає рівень глобальної узгодженості системи, і його мінімізація означає досягнення стабільного режиму обміну даними.

Модель наскрізної спільної оптимізації (EJOHM-6G Framework). Концепція EJOHM-6G (End-to-End Joint Optimization and Hybrid Management) формується як інтегрована архітектура, у якій усі рівні мережевої системи – антенний, транспортний та ресурсний взаємодіють через когнітивну нейронну мережу, здатну самостійно коригувати параметри роботи відповідно до змін трафіку, енергетичних обмежень та топологічних умов [4]. Її принциповою відмінністю

є синхронна багаторівнева оптимізація, коли рішення про зміну режиму антенного формування, маршрутизації чи виділення ресурсів приймається не локально, а колективно, на основі інтегрованого вектора станів системи. Архітектура багаторівневої оптимізації складається з трьох взаємопов'язаних шарів – антенного, транспортного та ресурсного. На антенному рівні мінімізується сукупна потужність випромінювання при збереженні необхідного коефіцієнта підсилення, що формально задається функцією [5]:

$$\min_{w_i, \phi_i} = \sum_{k=1}^{N_A} P_i(w_i, \phi_i) \quad (12)$$

за умови:

$$G_i(w_i, \phi_i) \geq G_{req}, \quad (13)$$

де:

w_i – ваговий коефіцієнт підмасиву;

ϕ_i – фазовий зсув;

G_i – локальний коефіцієнт підсилення. У процесі оптимізації функція E_A оцінюється не лише на основі енергетичних характеристик антен, але й з урахуванням метрик взаємної інтерференції, що визначаються як функція просторової кореляції сигналів між сусідніми променями.

На транспортному рівні цільова функція спрямована на мінімізацію середньої затримки у магістральних каналах і рівномірне завантаження вузлів маршрутизації. Для системи з M маршрутами загальний критерій ефективності опишемо як:

$$\min_{r_j} = ET = \sum_{j=1}^M (\tau_j + \xi_j L_j), \quad (14)$$

де:

τ_j – затримка на j -му маршруті;

L_j – довжина шляху;

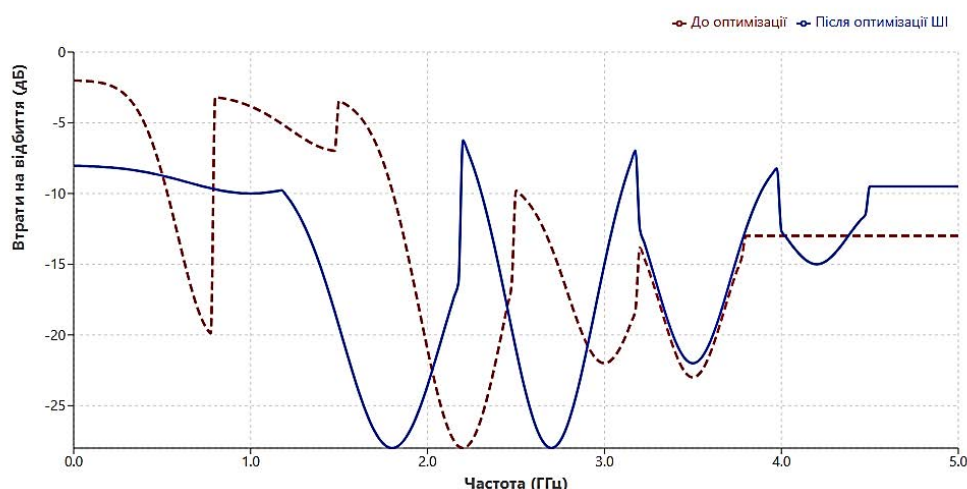


Рис. 1. Залежність втрат на відбиття від частоти для антенної системи до та після наскрізної спільної оптимізації (сформовано авторами)

ξ_j – ваговий коефіцієнт пріоритету, що коригується залежно від типу трафіку (відео, IoT, control plane).

Система динамічно переналаштовує маршрути так, щоб потік даних переміщувався у зони мінімальної затримки при збереженні стабільності каналів. На ресурсному рівні здійснюється балансування між енергоспоживанням, пропускну здатністю і якістю обслуговування користувачів [13]. Цільова функція тут має форму:

$$\max_{x_i, P_i} ER = \sum_{i=1}^{N_U} [\beta_1 \log(1 + SINR_i) - \beta_2 P_i - \beta_3 D_i], \quad (15)$$

де:

x_i – стан користувача;

P_i – потужність передавача;

D_i – затримка;

Коефіцієнти $\beta_{1,2,3}$ задають вагу для показників швидкості, енергоспоживання й затримки. Отже маємо, що ресурсна підсистема EJOHM-6G перетворює задачу багатокритеріальної оптимізації

у єдиний функціонал, у якому зміна будь-якого параметра спричиняє каскадну реакцію на суміжних рівнях (рис. 2).

Загальна функція наскрізної оптимізації формується як зважене поєднання трьох рівнів:

$$F_{EJOHM} = \lambda_A E_A + \lambda_T E_T + \lambda_R E_R, \quad (16)$$

коли $\lambda_A + \lambda_T + \lambda_R = 1$.

Коефіцієнти λ_i обчислюються динамічно через AI-модуль на основі реального навантаження системи, тому архітектура EJOHM-6G фактично реалізує адаптивну нормалізацію пріоритетів між енергетичними, топологічними й користувацькими параметрами [4].

Для забезпечення збіжності процесу в межах допустимого часу використовуються умови Ляпунова стабільності:

$$V'(t) = \frac{dV}{dt} = \nabla F_{EJOHM} \cdot \dot{X}(t) < 0, \quad (17)$$

що гарантуватиме асимптотичну стабільність усієї системи при зміні вхідних параметрів $X(t)$.

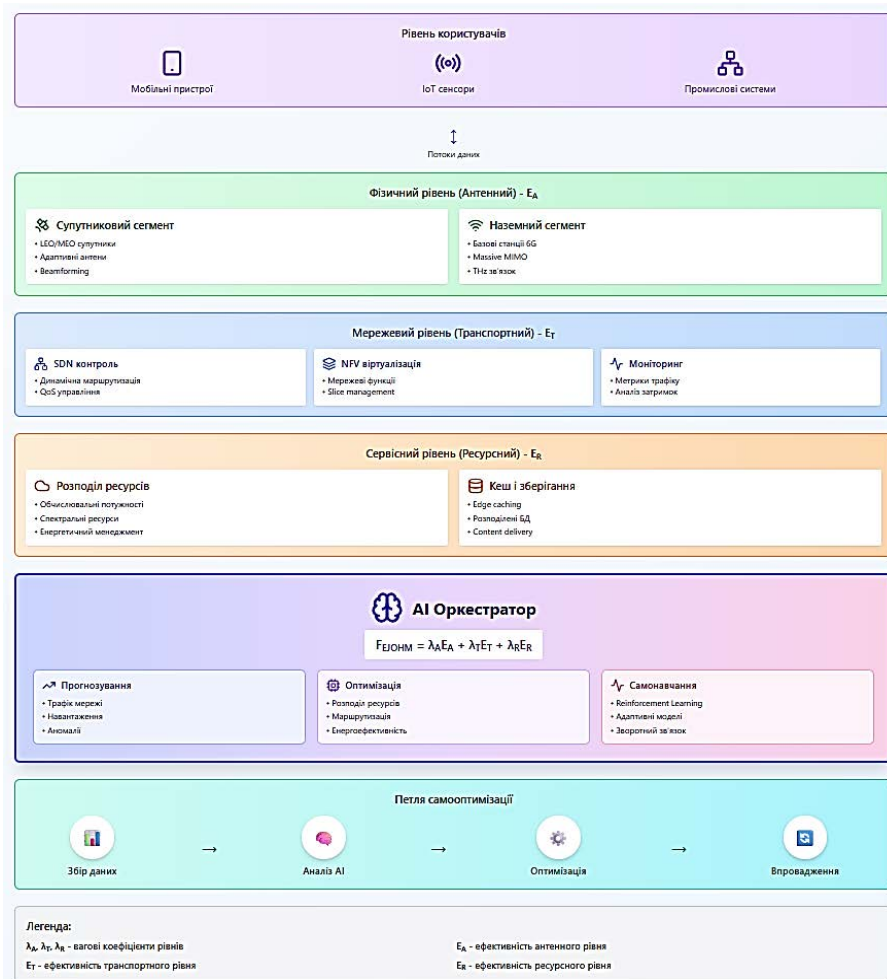


Рис. 2. Архітектура наскрізного інтелектуального оркестрування в конвергентних мережах (розроблено авторами)

Така конструкція робить модель EJOHM-6G не просто набором взаємопов'язаних підсистем, а динамічною рівновагою у просторі багатокритеріальних рішень. У результаті, EJOHM-6G Framework формує інтегровану когнітивну екосистему, в якій багаторівнева оптимізація та мультиагентне AI-керування створюють автономну модель мережевої еволюції [16]. Архітектурне рішення цілісно інтегрує аналітичну точність багатокритеріальних підходів із адаптивністю методів глибинного навчання, що забезпечує одночасну адаптацію параметрів антенного, транспортного та ресурсного рівнів у реальному часі – в автономному режимі, з мінімальною затримкою управління та максимальною стабільністю системного функціонування.

Висновки. За результатами проведеного дослідження встановлено, що впровадження багаторівневої моделі наскрізної комплексної оптимізації в архітектурі гібридних телекомунікаційних систем уможливорює інтеграцію антенного, транспортного та ресурсного рівнів у єдину когнітивну структуру з динамічною міжпараметричною взаємодією. Визначено, що конструювання цільової функції забезпечує одночасне зменшення енергетичних витрат, мінімізацію затримок та максимізацію пропускнуєї спроможності мережі, тоді як застосування отриманих вагових коефіцієнтів формує оптимальне співвідношення між ефективністю функціонування та стабільністю сервісного обслуговування в умовах варіативного наванта-

ження, що становить фундамент для самоадаптивних систем 6G-генерації.

Обґрунтовано, що імплементація гібридної метаевристичної методології HAOA-DNN, яка синтезує фізично інспірований алгоритм Архімеда, стохастичний механізм Levy Flight та глибинне навчання з підкріпленням конститууюють інноваційний підхід до глобальної оптимізації у багатовимірних параметричних просторах. Така інтеграція уможливує не лише ідентифікацію глобальних мінімумів функції енергетичних витрат, а й гарантує стабільну конвергенцію у регіонах локальної стійкості. Запропонована методологія демонструє високу ефективність для адаптивного керування антенними структурами, де параметри амплітудних коефіцієнтів, фазових зсувів та більш потужних характеристик коригуються відповідно до поточного трафікового навантаження, що забезпечує редукцію інтерференційних завад та підвищення спектральної ефективності DAS-мереж.

Доведено, що розроблена модель EJOHM-6G Framework із інтегрованим AI-оркестратором та мультиагентною системою управління створює когнітивне середовище координації між антенними конфігураціями, супутниковими сегментами та волоконно-оптичними трактами. Вона забезпечує автоматизоване планування, безперервний моніторинг і самокорекцію мережевих параметрів у режимі реального часу, реалізуючи концепцію динамічної рівноваги між енергетичними, топологічними та QoS-характеристиками.

Список літератури:

1. Волошин В. О., Мадінов М. Л., Бойко О. В., Мацкевич В. Л., Паламарчук В. О. Інтелектуальні алгоритми корекції помилок у супутниково-оптичних мережах для високошвидкісних передач даних. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. № 2 (36 (75)). С. 78–83. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/12>
2. Галика К., Бойко О., Мадінов М., Волошин В., Галаган Н. Методи покращення стійкості та ефективності комунікаційних мереж у складних умовах. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. № 353 (3.2). С. 349–356. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-49>.
3. Abdelahy M. A., Youssef M., Madi G. A Hybrid Algorithm for the Synthesis of Distributed Antenna Arrays with Dynamic Range Ratio Control. Proceedings of the 2025 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt). July 2025. <https://doi.org/10.1109/ITC-Egypt66095.2025.11186695>.
4. Adasme P., Dehghan Firoozabadi A., San Juan E. Bridging Classic Operations Research and Artificial Intelligence for Network Optimization in the 6G Era: A Review. Symmetry. 2025. Vol. 17. No. 8. p. 1279. <https://doi.org/10.3390/sym17081279>
5. Adegoke S. A., Sun Y., Wang Z., Oladipo S. Network Reconfiguration Using Hybrid Archimedes Optimization Algorithm for Multiobjective Functions. Journal of Electrical and Computer Engineering. 2024. Article ID 6682046. <https://doi.org/10.1155/jece/6682046>
6. Albeshr A. A. Mitigating Network Congestion in High-Density Areas Through Advanced Distributed Antenna Systems. Thesis. Rochester Institute of Technology; 2024. URL: https://repository.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/theses/article/13150/&path_info=AAIbeshrThesis12_2024.pdf
7. Bagheri A., Bencivenni C., Glazunov A. A. Comparing 5G hybrid beamforming in indoor environments–collocated vs distributed mmWave arrays. Frontiers in Communications and Networks. 2024. Vol. 5. Article 1354628. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2024.1354628>
8. Chabira C., Shayea I., Nurzhaubayeva G., Aldasheva L., Yedilkhan D., Amanzholova S. AI-Driven Handover Management and Load Balancing Optimization in Ultra-Dense 5G/6G Cellular Networks. Technologies. 2025. Vol. 13/ No. 7. p. 276. <https://doi.org/10.3390/technologies13070276>
9. Dewangan A., Rajagopal N. K., Bitar A. A., Velankanni T. Roseline. AI-Powered Optimization of Antenna Arrays: Enhancing Communication Performance Through Strategic Business Management. Proceedings

of the 2025 International Conference on Technology Enabled Economic Changes (InTech). February 2025. DOI: 10.1109/InTech64186.2025.11198392.

10. El-Hajj M. Enhancing Communication Networks in the New Era with Artificial Intelligence: Techniques, Applications, and Future Directions. *Network*. 2025. Vol. 5/ No. 1. p. 1. <https://doi.org/10.3390/network5010001>

11. Gajbhiye P. A., Singh S. P., Sharma M. K. A comprehensive review of AI and machine learning techniques in antenna design optimization and measurement. *Discover Electronics*. 2025. Vol. 2. Article 46. <https://doi.org/10.1007/s44291-025-00084-9>

12. Islam T., Hussain D., Alsunaydih F. N., Alsaleem F., Alhasoon K. Designing a Novel Hybrid Technique Based on Enhanced Performance Wideband Millimeter-Wave Antenna for Short-Range Communication. *Sensors*. 2024. Vol. 24(10). Article 3219. <https://doi.org/10.3390/s24103219>

13. Ji W., Ji W., Yun H., Shi X. Y., Yin P. The Distributed Antenna System and Wireless Positioning Mechanism Based on Optimized Radio-Over-Fiber Technology. 2022. December. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2360888/v1>.

14. Kamal M. M., Khan I., Al-Khasawneh M. A., et al. Hybrid optimization-based deep learning for energy efficiency resource allocation in MIMO-enabled wireless networks. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 31642. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16571-8>

15. Kilzi A., Farah J., Abdel Nour C., Douillard C. New Power Minimization Techniques in Hybrid Distributed Antenna Systems with Orthogonal and Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2019. Vol. 3. No. 3. pp. 679–690. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2019.2916325>

16. Makedon V., Budko O., Salyga K., Myachin V., Fisunen N. Improving Strategic Planning and Ensuring the Development of Enterprises Based on Relational Strategies. *Theoretical And Practical Research In Economic Fields*. 2024. Vol. 15. No. 4. pp. 798–811. [https://doi.org/10.14505/tpref.v15.4\(32\).02](https://doi.org/10.14505/tpref.v15.4(32).02)

17. Makedon V., Myachin V., Alosyna T., Cherniavska I., Karavan N. Improving the Readiness of Enterprises to Develop Sustainable Innovation Strategies through Fuzzy Logic Models. *Economic Studies (Ikonomiccheski Izsledvania)*. 2025. Vol. 34, No. 5. pp. 165–179. URL: https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf

18. Pervez F., Zhao L., Yang C. Joint User Association, Power Optimization and Trajectory Control in an Integrated Satellite-Aerial-Terrestrial Network. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2022. Vol. 21. No. 5. pp. 3279–3290. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3120264>

19. Singla A., Criscola F., Canales D., Fraire J. A., Calveras A., Ruiz-de-Azua J. A. Toward integrated satellite operations and network management: A review and novel framework. *Technologies*. 2025. Vol. 13(8). p. 312. <https://doi.org/10.3390/technologies13080312>

20. Tan Xue Gang., Yuan Yang., He Wang Li., Cao Jin De., Huang Ting Wen. Distributed hybrid optimization for multi-agent systems. *Science China Technological Sciences*. 2022. Vol. 65, No. 8. <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2060-7>.

21. Zhu L., Ma W., Mei W., Zeng Y., Wu Q., Ning B., Xiao Z., Shao X., Zhang J., Zhang R. A Tutorial on Movable Antennas for Wireless Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2025. <https://doi.org/10.1109/comst.2025.3546373>.

Matskevych V.V., Palamarchuk V.O., Voloshyn V.O., Madinov M.L., Boyko O.V.

END-TO-END JOINT OPTIMIZATION OF HYBRID NETWORKS WITH DISTRIBUTED ANTENNA SYSTEMS, AI CONTROL, SATELLITE COVERAGE EXTENSION, ENHANCED FIBER-OPTIC LINES, AND TRAFFIC-AWARE RESOURCE MANAGEMENT

The article focuses on studying end-to-end joint optimization models for sixth-generation (6G) hybrid telecommunication networks that integrate distributed antenna systems (DAS), satellite components, fiber-optic transport infrastructure, and artificial intelligence (AI) functions, including AI-based control, traffic-adaptive resource allocation, and dynamic service coverage extension. The main goal of the research is to develop a comprehensive integrated model of end-to-end joint optimization (EJOHM-6G), which enables synchronized optimization of antenna, transport, and resource layers of the network using intelligent machine learning methods. Experimental results confirm the effectiveness of the proposed model: compared to traditional collocated antenna arrays, EJOHM-6G reduces power consumption in distributed antenna systems while maintaining reliability and connection stability. The use of the hybrid optimization algorithm HAOA-DNN dynamically adapts the spatial positioning of movable antennas and manages beamforming, minimizing inter-channel interference and improving spectral efficiency through potential function optimization U. The core element of the architecture is an AI orchestrator that ensures cognitive cross-layer synchronization via the correlation matching function $\Phi(t)$. The Lyapunov stability analysis confirms the asymptotic stability of the closed dynamic system. The practical significance of the research lies in the ability to integrate the EJOHM-6G model into real 6G infrastructures to provide autonomous, AI-driven resource management—especially relevant under high-traffic density and dynamic user mobility. Future studies foresee integrating the model with quantum communication and edge computing technologies to enhance cybersecurity, reduce data-processing latency, and ensure scalability in emerging 6G ecosystems.

Key words: end-to-end optimization, hybrid networks, distributed antennas, artificial intelligence, metaheuristics, 6G orchestration.

Дата надходження статті: 10.11.2025

Дата прийняття статті: 02.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Михалевський Д.В.

Вінницький національний технічний університет

Бриль Д.Р.

Вінницький національний технічний університет

ОЦІНЮВАННЯ ПОКРИТТЯ КОРПОРАТИВНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ WI-FI ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАСОБІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У роботі проведено дослідження можливості оцінювання покриття корпоративних телекомунікаційних безпроводних мереж стандарту Wi-Fi за допомогою засобів штучного інтелекту. Для цього проведено аналіз існуючих методів побудови штучних нейронних мереж, які мають високу ефективність у завданнях прогнозування та оцінювання параметрів каналів передачі інформації. Встановлено доцільність використання нейронних мереж на базі вентильних рекурентних блоків, що є основою для побудови трансформера, для аналізу та ефективної обробки послідовних даних для оцінювання параметрів безпроводних каналів. Такі нейронні мережі здатні запам'ятовувати релевантну інформацію для пов'язаних параметрів, що дозволяє моделювати довгострокові залежності між ними.

На основі сучасного алгоритму штучного інтелекту на базі трансформера, проведено оцінювання основного енергетичного параметра та визначення його зміни від архітектурних перешкод. За допомогою механізму перехресного затвердження оптимальної моделі оцінювання із застосуванням середньої квадратичної помилки та коефіцієнту детермінації, на основі вимірних значень отримано функції розподілу сигналу у приміщенні. За допомогою машинного навчання проведено дослідження оптимальних моделей побудови поверхні поширення сигналу. Встановлено, що для побудови максимально наближених поверхонь є використання поліноміальної моделі із ступенем 3, а для операцій прогнозування доцільно застосовувати поліноміальну функцію з ступенем 2.

Запропоновано комплексний підхід для оцінювання просторового розподілу основного енергетичного параметра, який включає наступні етапи: створення бази даних, отримання оптимальної функції на основі середньої помилки та коефіцієнту детермінації; прогнозування поширення сигналу; прогнозування флуктуацій сигналу біля архітектурних перешкод та кутів приміщення; порівняння із існуючими моделями та визначення похибок. Такий підхід дає можливість оцінювати як поширення сигналу у просторі, так і врахування факторів впливу.

Ключові слова: модель оцінювання, безпроводні канали, корпоративна телекомунікаційна мережа, нейронні мережі, штучний інтелект, статистичний аналіз.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних телекомунікаційних технологій стандартів 5G/Wi-Fi, спонукає до підвищення вимог точності і оперативності операції моніторингу та оцінювання параметрів безпроводних каналів. Застосування традиційних методів оцінювання, заснованих на детермінованих моделях та статистичному аналізі, часто не забезпечують достатньої ефективності в умовах складної й динамічної зміни параметрів середовища передачі інформації [1], що обумовлено існуванням значної кількості факторів впливу різного роду. Це створює потребу в розробці нових підходів, здатних враховувати такі фактори із мож-

ливістю адаптації, залежно від умов поширення хвиль для підвищення ефективності методів та засобів оптимізації ресурсів безпроводних мереж. Одним із напрямків вирішенні такої проблеми є застосування алгоритмів штучного інтелекту та технологій машинного навчання, які мають значний потенціал для дослідження каналного та фізичного рівнів [2]. Здатність алгоритмів штучного інтелекту виявляти складні нелінійні залежності й закономірності, у великих обсягах даних, робить їх перспективним інструментом для оцінювання та прогнозування параметрів безпроводних каналів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Як відомо [3], ефективність функціонування безпроводних систем передачі інформації значною мірою залежить від точності оцінювання наступних параметрів радіоканалу: коефіцієнт згасання сигналу, який характеризує ослаблення потужності сигналу при поширенні хвиль від передавача до приймача; багатопроменеве поширення хвиль, що відображає явище надходження сигналу до приймача через середовище передачі із різними затримками; доплерівське зміщення частоти, що являє собою зміну частоти сигналу внаслідок руху передавача, приймача або об'єктів навколишнього середовища; затримка поширення сигналу, що характеризується часом проходження сигналу від передавача до приймача; міжсимвольна інтерференція, де символи сигналу впливають один на одного; відношення рівня сигнал/шум; пропускну здатності каналу та ін. Кожен із перерахованих параметрів потребує відповідних методів та засобів аналізу та врахування різноманітних факторів впливу. Із них можна виділити декілька груп традиційних підходів до оцінювання таких параметрів безпроводних каналів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Одним із напрямків вивчення фізичних законів поширення хвиль та геометричних особливостей середовища передачі можна виділити детерміновані моделі: модель вільного простору та подальші її модифікації, та модель відбиття від земної поверхні з моделями дифракції [4]. Процес оцінювання за такими моделями передбачає наявність наперед відомих параметрів та відсутність врахування випадкових факторів впливу. Якщо використовувати протилежний підхід, можна виділити емпіричні моделі, такі як модель Окумура-Хата, модель COST231, модель Уолфіша-Ікегами та ін. Особливістю їх є використання експериментальних вимірювань у різних умовах поширення радіосигналу та отримання коефіцієнтів згасання [5]. Крім того, використовуючи експериментальні дослідження можна використовувати ймовірнісні характеристики для опису випадкових процесів у каналі, такі як: Релеєвський розподіл для моделювання завмирань; розподіл Райса для каналів з прямою видимістю та логнормальний розподіл для моделювання згасання сигналу. Такі методи отримали широке використання в практичному проектуванні та експлуатації безпроводних мереж та систем передачі інформації, але вони мають певні обмеження. Зокрема, детерміновані та емпіричні моделі часто не враховують усіх факторів, що впливають на

поширення сигналу, а статистичні методи вимагають значного обсягу даних для досягнення необхідної точності [6–7]. Наприклад, класичні моделі згасання не забезпечують достатньої достовірності результатів оцінювання в складних умовах щільної міської забудови та всередині приміщень. Для подолання таких недоліків широкого використання набули методи штучного інтелекту, які дозволяють створювати більш адаптивні моделі оцінювання параметрів безпроводних каналів, що враховують різноманітні фактори впливу. Наприклад, у роботі [8] запропоновано використання багатопроменевих перцептрона для прогнозування згасання сигналу в міському середовищі. Нейронна мережа була навчена на даних вимірювань потужності сигналу в різних точках міста з урахуванням таких факторів, як: відстань між передавачем і приймачем; висота антен; щільність забудови; наявність перешкод; частота сигналу та погодні умови. Результати експериментальних досліджень показали, що модель на основі алгоритмів штучного інтелекту забезпечує на 15–20% вищу точність прогнозування порівняно з традиційними емпіричними моделями. Більш складний підхід запропонований у [9], де використовується комбінація згорткових нейронних мереж та рекурентних нейронних мереж з довгою короткочасною пам'яттю. Перші використовуються для обробки просторових характеристик середовища (карти місцевості, розташування будівель тощо), тоді як другі моделюють часову динаміку змін потужності сигналу. Такий гібридний підхід дозволив досягти середньоквадратичної помилки прогнозування потужності сигналу менше 3 дБ.

Таким чином, згідно проведеного аналізу, доцільно виділити можливість оцінювання одного із основних параметрів безпроводного каналу на базі алгоритмів штучного інтелекту з метою підвищення точності вихідних результатів та кращого визначення їх взаємозв'язку від різноманітних факторів впливу, що є актуальним.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз сучасних досягнень та перспектив застосування технологій штучного інтелекту для оцінювання основних параметрів безпроводних каналів передачі інформації, а також розробка комплексного підходу до застосування алгоритмів штучного інтелекту для оцінювання просторового розподілу основного енергетичного параметра.

Виклад основного матеріалу. Розвиток технологій штучного інтелекту відкриває нові можливості для вирішення завдань оцінювання параметрів безпроводних каналів. В цьому напрямку

можна проаналізувати відповідну класифікацію основних напрямків розвитку спеціалізованих алгоритмів для аналізу та прогнозування.

До першої групи можна віднести штучні нейронні мережі, які демонструють високу ефективність у завданнях прогнозування та оцінювання параметрів безпроводних каналів. Найбільш поширеними з них є [10, 11]: багаторівні перцептрони (MLP); згорткові нейронні мережі (CNN); рекурентні нейронні мережі (RNN) та мережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM). У завданнях прогнозування та класифікації параметрів безпроводного каналу важливо враховувати як часову динаміку, так і просторові спектри каналів. Наприклад, багаторівні перцептрони можуть бути достатніми для аналізу простих завдань із статичною обробкою даних, але для дослідження динамічних змін та багатовимірних даних точність їх значно зменшується. Для більш складних сценаріїв доцільніше використовувати рекурентні нейронні мережі та мережі із довгою короткочасною пам'яттю. Для аналізу декількох змінних одночасно використовуються гібридні архітектури, що комбінують переваги дослідження ознак із певної вибірки даних та здатність їх пов'язування із часовими залежностями. Вибір архітектури нейронної мережі залежить від певного завдання, обсягу даних та вимог до обчислювальних ресурсів.

До другої групи можна віднести подальший розвиток нейронних мереж, що привів до появи модифікацій так званих вентильних рекурентних блоків (GRU), які використовуються для ефектвної обробки послідовних даних, таких як текст, мова, часові ряди та ін. Такі нейронні мережі здатні

запам'ятовувати важливу інформацію з попередніх кроків вхідної послідовності та забувати нерелевантну, що дозволяє моделювати довгострокові залежності між параметрами. Такий тип нейронних мереж отримав назву «трансформерів» [12], які можна досить ефективно застосовувати у прогнозуванні параметрів і характеристик каналів передачі інформації, особливо в умовах високої динаміки та складних середовищ, де існує значна кількість факторів впливу.

Застосуємо трансформер, як основну технологію сучасних алгоритмів штучного інтелекту, для оцінювання розподілу поширення сигналу для безпроводних каналів корпоративних телекомунікаційних мереж стандарту Wi-Fi. Для цього проведено експериментальні дослідження основного енергетичного параметра, для типового приміщення розмірами $(l;d)=10\times10$ м із архітектурними перешкодами у вигляді стін. Мережа складалась із точки доступу стандарту Wi-Fi та абонентського пристрою. За допомогою засобів моніторингу абонентського пристрою проведено ряд вимірювань потужності сигналу у діапазоні 2,4 ГГц із висотою антен на рівні 1,5 м [13–14]. Отриманий масив даних проаналізовано та досліджено із використанням алгоритмів штучного інтелекту на базі трансформера та методів статистичного аналізу. Оскільки, приміщення складалось із декількох кімнат, то для візуалізації результатів досліджень можна використати побудову поверхні розподілу сигналу для окремих кімнат із подальшим їх об'єднанням. Поверхня розподілу сигналу в частотному діапазоні 2,4 ГГц, побудована за допомогою штучного інтелекту, показано на рис. 1а.

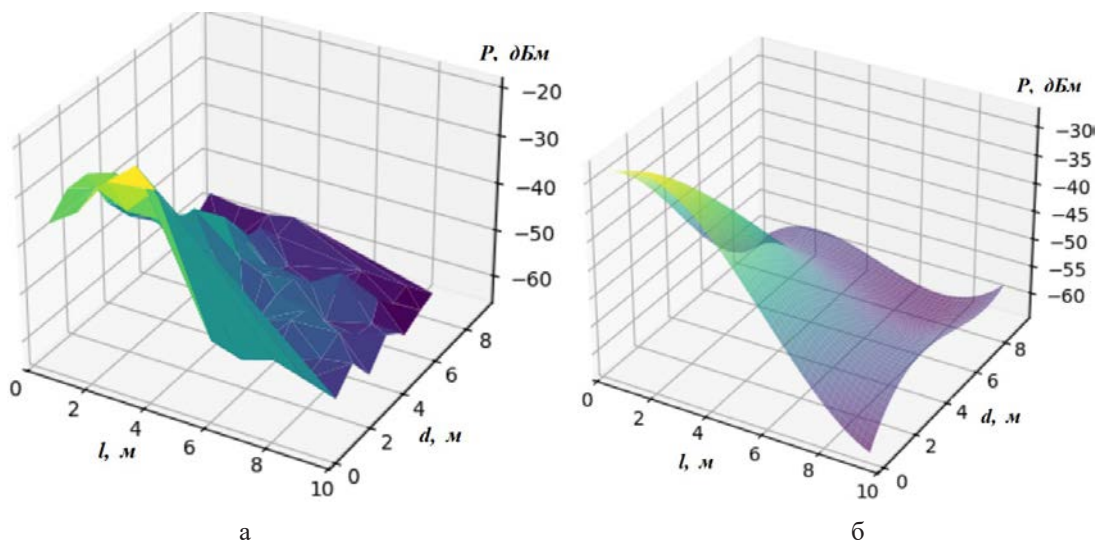


Рис. 1. Розподіл сигналу у приміщення за результатами експериментальних досліджень (а) та їх регресійний аналіз

На основі рис. 1 а, виконано аналіз поверхні із застосуванням механізму перехресного затвердження оптимальної моделі оцінювання, що передбачає визначення середньої квадратичної помилки та коефіцієнту детермінації, використовуючи наперед створену базу даних. Найбільш оптимальним описом є поліноміальна модель зі ступенем 3, яку можна записати так:

$$P = a_1 l^3 + a_2 d^3 + a_3 l^2 + a_4 d^2 + a_5 l^2 d + a_6 l d^2 + a_7 l + a_8 d + a_9 l d + P_0, \quad (1)$$

де $a_1 \dots a_9$ – коефіцієнти затухання моделі; P_0 – початковий рівень.

Графічне представлення отриманої моделі наведено на рис. 1 б. Оскільки алгоритми штучного інтелекту працюють на базі моделей із машинним навчанням, то було проведено прогнозування поверхні для більших розмірів приміщення. Для цього, збільшено довжину та ширину приміщення, що передбачає побудову прогнозованих значень розподілу основного енергетичного параметра. Результати прогнозування за виразом (1) наведено на рис. 2 а.

Як видно із графіку, використання моделі із ступенем 3 та вище передбачає отримання максимально наближених поверхонь до отриманих експериментальних даних, проте для операцій оцінювання та прогнозування поверхонь поширення сигналу є недоцільним, оскільки це приводить до виникнення значних похибок. На малюнку це спостерігається як зона що знаходиться за координатами (10;10) м, тому використання такої моделі має обмеження, що обумовлено отриманими даними. Для зменшення похибки, доцільно використовувати поліноміальні моделі із ступенем 2:

$$P = b_1 l^2 + b_2 d^2 + b_3 l d + b_4 l + b_5 d + P_0, \quad (2)$$

де $b_1 \dots b_5$ – коефіцієнти затухання моделі.

Результат прогнозування за моделлю (2) наведено на рис. 2 б. Така модель розширює значення границь оцінювання, але неідеальна для великих довжин каналу, більше 20 м, хоча для приміщень із архітектурними завадами, цього є достатньо. Але, як відомо, [1] біля стін, особливо кутів, приміщення спостерігається значна нерівномірність просторового розподілу сигналу за рахунок існування максимумів та мінімумів, особливо на певних відстанях від точки доступу. Найбільший вагомий внесок таких флуктуацій проявляється на границі стелі та підлоги зі стінами, що в результаті приводить до знаного зменшення пропускної здатності. Тому за виразом (2) можна виконувати прогнозування флуктуацій сигналу у приміщеннях із архітектурними перешкодами із використанням обернених коефіцієнтів затухання. Приклад наведено на рис. 3 а.

Використовуючи можливості трансформера та отриману базу даних результатів експериментальних досліджень, проведемо порівняльний аналіз отриманого розподілу на базі квадратичної моделі (2) (позначимо, як поверхня 1) із результатами на основі поширених моделей затухання сигналу. Для досліджень використано такі моделі: Okumura-Hata extrapolated (поверхня 2), ITU-R P.1238 indoor (поверхня 3), COST231-Walfisch-Ikegami (поверхня 4), Log-Distance Path Loss Model (поверхня 5), ECC-33 (Extended Hata) (поверхня 6). Ці моделі були адаптовані до параметрів безпроводного каналу на базі якого отримано експериментальні дані (позначено як 7) та застосовано обробку результатів алгоритмами машинного навчання. Результати отриманих досліджень наведено на рис. 3 б.

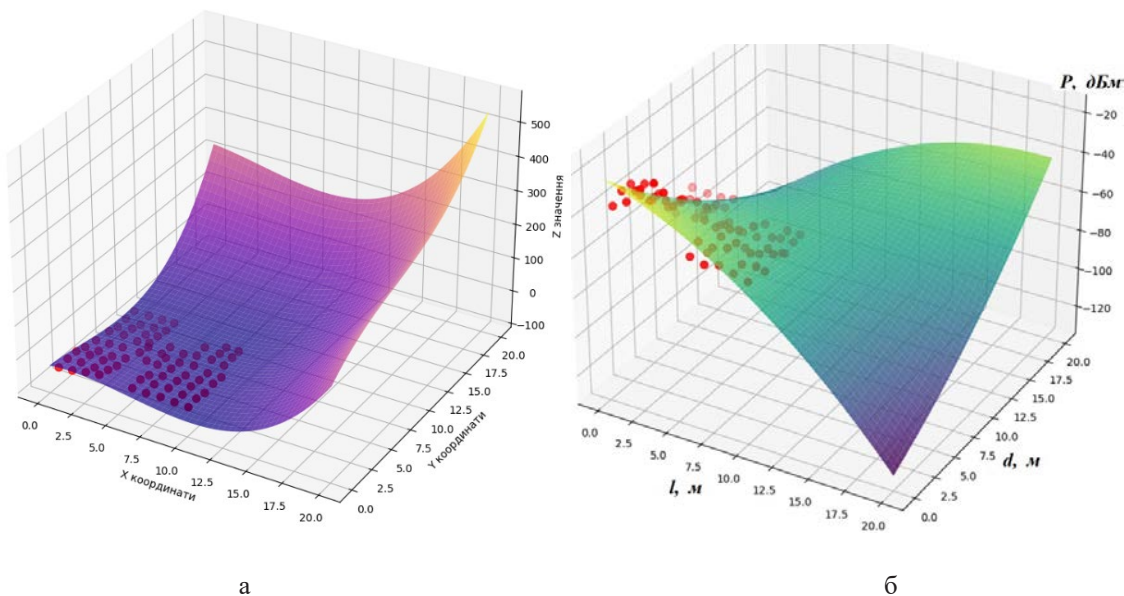


Рис. 2. Результати прогнозування за поліноміальною моделлю за порядком 3 (а) та 2 (б)

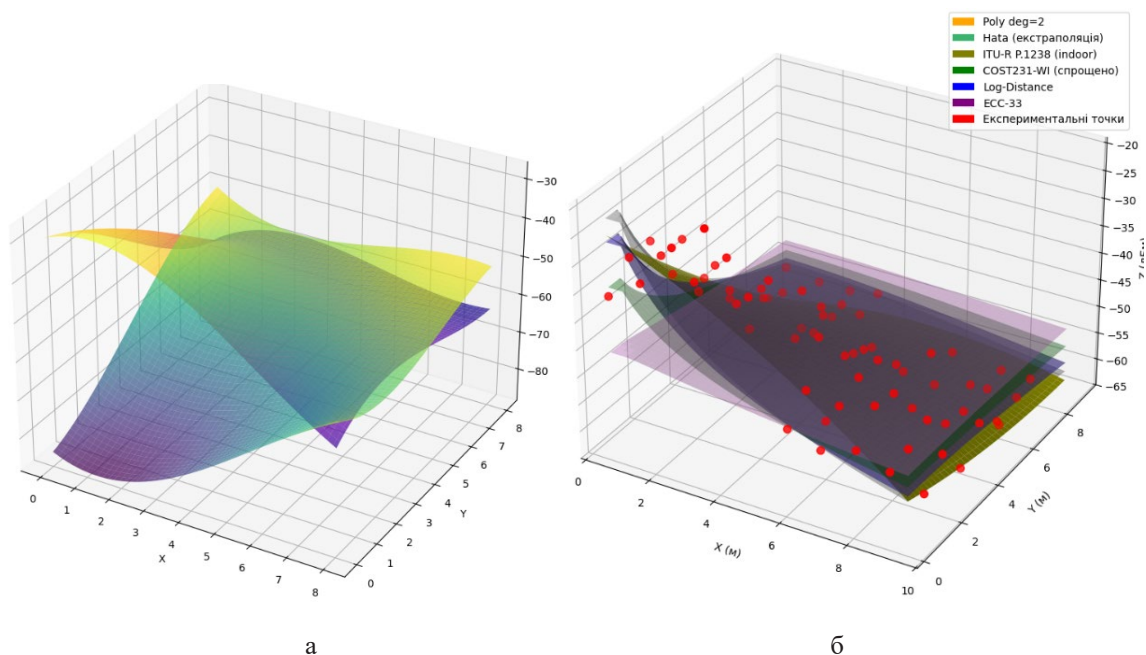


Рис. 3. Оцінювання флуктуацій сигналу у приміщенні (а) та порівняння моделей затухання

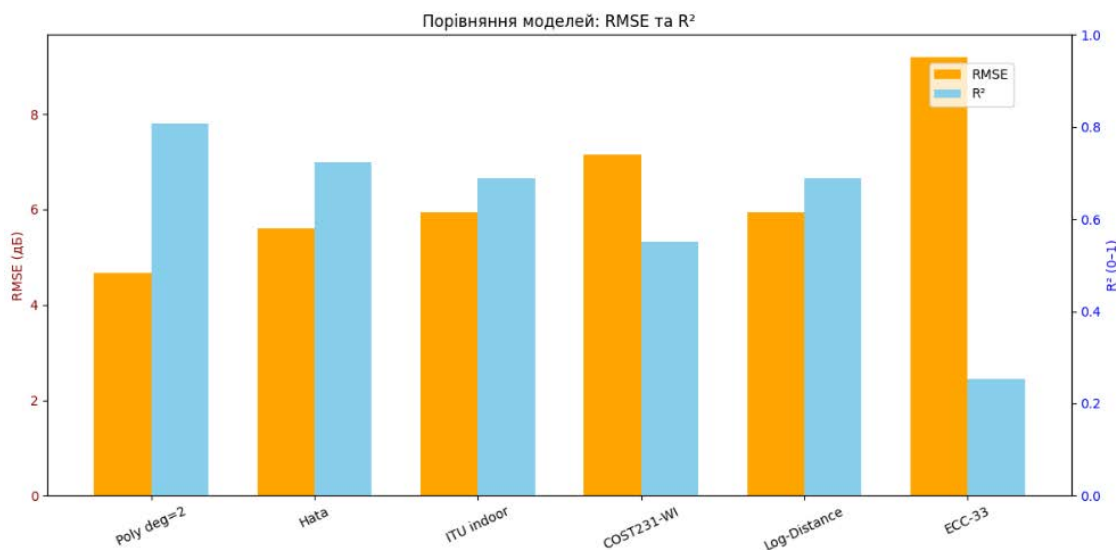


Рис. 4. Результати порівняння моделей

Результати порівняння моделей на основі середньої помилки (замість середньоквадратичної) та коефіцієнту детермінації наведено на рис. 4.

Висновки. Таким чином, встановлено, що використання засобів штучного інтелекту, зокрема трансформера, для оцінювання покриття корпоративних телекомунікаційних мереж стандарту Wi-Fi дає можливість значного спрощення, гнучкості та швидкодії операцій аналізу та візуалізації. На основі проведених досліджень запропоновано комплексний підхід для оцінювання просторового розподілу основного енергетичного пара-

метра, який включає наступні етапи: створення бази даних, отримання оптимальної функції на основі середньої помилки та коефіцієнту детермінації; прогнозування поширення сигналу; прогнозування флуктуацій сигналу біля архітектурних перешкод та кутів приміщення; порівняння із існуючими моделями та визначення похибок. На основі порівняння класичних моделей за середньою помилкою та коефіцієнта детермінації, підтверджено, що оптимальною моделлю оцінювання корпоративних телекомунікаційних мереж у приміщенні є квадратична функція.

Список літератури:

1. Mykhalevskiy D. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №6/9 (108). Pp. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218720>.
2. Wang T., Wen C.K., Wang H., Gao F., Jiang T., Jin S. Deep learning for wireless physical layer: Opportunities and challenges. *China Communications*. 2017. Vol. 14. № 11 Pp. 92–111. DOI: <https://doi.org/10.1109/CC.2017.8233654>
3. Ye Z. Exploring Impact of Doppler Effect on Time-Varying Multipath Wireless Communication Channels via Model Based Characteristic Analysis. *WSEAS Transactions on Signal Processing*. 2024. Vol. 20., Pp. 145–152. DOI: <https://doi.org/10.37394/232014.2024.20.15>
4. Saunders S.R., Aragon-Zavala A. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems* (2nd Edition). Wiley. 2007. 524 p.
5. Sarkar T.K., Ji Z., Kim K., Medouri A., Salazar-Palma M. A survey of various propagation models for mobile communication. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2003. Vol. 45, № 3. Pp. 51–82.
6. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing. Conference Proceeding. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine. Pp. 369–372.
7. Mykhalevskiy D., Vasylykivskiy N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4/9 (88). Pp. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114191>.
8. Agarwal T., Bandyopadhyay S., Mehta N.B. Learning based channel prediction for interference alignment in multiple antenna systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021. Vol. 20. № 3. Pp. 1696–1711.
9. Zhang C., Patras P., Haddadi H. Deep learning in mobile and wireless networking: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21. № 3, Pp. 2224–2287. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2904897>
10. Ye H., Li G.Y., Juang B.H. Power of deep learning for channel estimation and signal detection in OFDM systems. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2018. Vol. 7. № 1. Pp. 114–117. DOI: <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2757490>
11. He H., Wen C.K., Jin S., Li G.Y. Deep learning-based channel estimation for beamspace mmWave massive MIMO systems. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2018. Vol. 7. № 5. Pp. 852–855.
12. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). Long Beach. CA. USA. 2017. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>.
13. Mykhalevskiy D. V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*. 2019. № 1. Pp. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2019-0004>.
14. Mykhalevskiy D. V., Kychak V. M. Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard. *Latvian journal of physics and technical sciences*. 2019. № 2. Pp. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2019-0009>.

Mykhalevskiy D.V., Bryl D.R. EVALUATION OF COVERAGE OF CORPORATE WIRELESS WI-FI NETWORKS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS

In this paper, investigates the possibility of evaluating the coverage of corporate telecommunication wireless Wi-Fi networks using Artificial Intelligence (AI) tools. To achieve this, an analysis of existing methods for constructing artificial neural networks was conducted, focusing on those that exhibit high effectiveness in tasks involving the prediction and evaluation of information transmission channel parameters. The expediency of using neural networks based on Gated Recurrent Units (GRUs), which form the basis for constructing the Transformer architecture, was established for the analysis and effective processing of sequential data to evaluate wireless channel parameters. Such neural networks are capable of memorizing relevant information for related parameters, allowing for the modeling of long-term dependencies between them.

Based on a modern AI algorithm utilizing the Transformer architecture, an evaluation of the main energy parameter was conducted, and its variation due to architectural obstacles was determined. Using a cross-validation mechanism for the optimal evaluation model, which employed the Mean Squared Error (MSE) and the Coefficient of Determination (R²), the signal distribution functions within the premises were derived from measured values. Research on the optimal models for constructing the signal propagation surface was carried out using machine learning. It was established that for building the most closely approximated surfaces, a polynomial model of degree 3 should be used, while for prediction operations, it is advisable to apply a polynomial function of degree 2.

A comprehensive approach is proposed for evaluating the spatial distribution of the main energy parameter, which includes the following stages: database creation; obtaining the optimal function based on the mean error and the coefficient of determination; signal propagation prediction; prediction of signal fluctuations near architectural obstacles and room corners; comparison with existing models and error determination. This approach makes it possible to evaluate both the signal's spatial distribution and the influence of various factors.

Key words: evaluation model, wireless channels, corporate telecommunication network, neural networks, artificial intelligence, statistical analysis.

Дата надходження статті: 22.10.2025

Дата прийняття статті: 11.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Редько І.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тонкоглас Ю.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЛІНІЙНО-ЧАСТОТНО МОДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

У статті представлено комплексний аналіз лінійно-частотно модульованих (ЛЧМ) сигналів, які широко застосовуються в радіолокаційних системах виявлення повітряних об'єктів. Показано, що ЛЧМ є базовим типом зондувального сигналу, здатним забезпечити високу роздільну здатність за дальністю та швидкістю цілей при відносно низькій піковій потужності випромінювання, що робить його ефективним у сучасних умовах перевантаженого радіочастотного спектра. Розглянуто різні види ЛЧМ – лінійні, нелінійні, двофрагментні, а також імпульсні сигнали. Встановлено їхні ключові відмінності за формою спектра, рівнем бічних пелюсток та ступенем стійкості до перешкод, що дозволяє визначати оптимальні режими застосування для конкретних радіолокаційних задач.

Математичне моделювання амплітудно-частотних (АЧХ), фазочастотних (ФЧХ) характеристик і функцій розподілу продемонструвало, що вибір бази сигналу безпосередньо впливає на точність виявлення об'єктів та здатність системи до їх розділення у просторі. Зокрема, збільшення часової бази імпульсу підвищує роздільну здатність за дальністю, однак потребує коректного налаштування частотної девіації для збереження енергетичної ефективності. У роботі розглянуто приклади використання ЛЧМ у різних частотних діапазонах та показано, що імпульсні ЛЧМ-сигнали залишаються основою для побудови оглядових і спеціалізованих радарів. Особливу увагу приділено апаратним рішенням: використанню інтегральних мікросхем DDS (зокрема AD9910) для генерації сигналів із керованими параметрами частоти, амплітуди й фази та застосуванню ПЛІС (Cyclone 10 LP) для реалізації алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (FFT), множення спектрів, пошуку пікових значень і оберненого перетворення (IFFT). Це забезпечує обробку сигналів у реальному часі з високою точністю та мінімальною затримкою. Отримані результати свідчать, що поєднання сучасних методів цифрової обробки з апаратною реалізацією на основі мікросхем DDS і ПЛІС дозволяє значно підвищити ефективність виявлення повітряних об'єктів у шумових середовищах, а також забезпечує перспективи створення компактних і енергоефективних радіолокаційних систем нового покоління.

Ключові слова: лінійно-частотно модульовані сигнали, імпульсна радіолокація, завадостійкість, FFT/IFFT, AD9910, Cyclone 10 LP.

Постановка проблеми. Сучасні радіолокаційні системи відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки морського та авіаційного транспорту, де точність виявлення та ідентифікації повітряних і надводних об'єктів визначає ефективність усієї навігаційної інфраструктури. Одним із базових інструментів радіолокації є лінійно-частотно модульовані (ЛЧМ) сигнали, які завдяки високій роздільній здатності та стійкості до шумових впливів застосовуються у більшості сучасних РЛС. Водночас їх практичне використання супроводжується низкою проблем. По-перше, у реальних умовах

експлуатації спектр ЛЧМ-сигналів зазнає впливу різноманітних завад, спричинених природними та техногенними чинниками – багатопроменевим поширенням, електромагнітними коливаннями, флуктуаціями фону. Це призводить до зниження точності визначення дальності та швидкості об'єктів. По-друге, існує кілька видів ЛЧМ – лінійні, нелінійні, комбіновані, імпульсні, – і кожен з них має специфічні переваги й обмеження. Питання вибору оптимального сигналу з урахуванням спектральних характеристик, рівня бічних пелюсток та стійкості до завад залишається відкритим.

Додатковим викликом є апаратна реалізація генерації та обробки ЛЧМ-сигналів у реальному часі. З одного боку, інтегральні мікросхеми прямого цифрового синтезу (наприклад, AD9910) дозволяють формувати сигнали з високою точністю за частотою, фазою й амплітудою. З іншого боку, обробка прийнятих сигналів вимагає реалізації складних алгоритмів (FFT/IFFT, кореляція, фільтрація) на базі ПЛІС (Cyclone 10 LP), що потребує оптимізації обчислювальних ресурсів. Недостатня швидкодія чи помилки синхронізації можуть призвести до спотворення спектральних характеристик і втрати інформації про цілі. Таким чином, проблема полягає у необхідності системного аналізу методів формування та обробки ЛЧМ-сигналів, визначенні їх завадостійкості, дослідженні впливу часової бази на точність виявлення об'єктів і розробленні практичних алгоритмів моделювання характеристик (АЧХ, ФЧХ, функцій розподілу). Це дозволить не лише підвищити ефективність роботи радарів у складних умовах, а й створити передумови для впровадження компактних і енергоефективних радіолокаційних комплексів нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях радіолокаційних систем значна увага приділяється вдосконаленню форм лінійно-частотно модульованих сигналів та підвищенню їх завадостійкості. У роботах [1; 2] представлено підходи до комбінування різних законів модуляції та моделювання FMCW-радарів у русі, що дозволяє врахувати вплив доплерівських зсувів. Дослідження [3–5] зосереджені на методах визначення параметрів ЛЧМ, зокрема оцінці миттєвої частоти та використанні стисненого відбору для зменшення обчислювальних витрат. Показано також можливості апаратної реалізації алгоритмів обробки на DSP-платформах.

Проблема виявлення сигналів та оцінки швидкості їхньої частотної зміни докладно висвітлена у [6], де використано часово-частотні методи аналізу. Важливим напрямом залишаються підходи до пригнічення інтерференцій у FMCW-радарів [7; 8]. У цих працях розроблено математичні алгоритми та порогові методи адаптивної обробки, які дозволяють зменшити вплив завад на точність визначення цілей.

Нові можливості відкриваються завдяки використанню фотонних технологій та широкосмугових методів компресії сигналів [9; 10], що забезпечує підвищення роздільної здатності та стійкості систем. Поряд із цим увага приділяється розвитку шумових радарів із застосуванням де-чирпінгу та алгоритмів узгодженого зіставлення [11]. Окремо

варто відзначити огляди сучасних напрямів автомобільної радіолокації [12], де підкреслено складність інтеграції алгоритмів у реальному часі, та визначення основних викликів майбутнього розвитку систем [13].

Отже, у літературі окреслено широкий спектр рішень: від розробки нових видів ЛЧМ-сигналів і методів їхньої обробки до апаратної реалізації на цифрових модулях. Водночас комплексних робіт, які б одночасно охоплювали аналіз спектральних характеристик, дослідження стабільності сигналів у складних умовах прийому та апаратну реалізацію з використанням DDS і ПЛІС, поки що бракує, що й визначає актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Постановка завдання. Метою дослідження є обґрунтування методів формування та обробки лінійно-частотно модульованих сигналів у радіолокаційних системах для підвищення точності виявлення повітряних об'єктів за умов впливу завад. Суть задачі полягає у порівнянні різних видів ЛЧМ – лінійних, нелінійних, комбінованих та імпульсних – з точки зору їх спектральних характеристик, рівня бічних пелюсток та стійкості до шуму. Необхідно змоделювати амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики, а також функції розподілу, щоб оцінити вплив параметрів сигналу й часової бази імпульсу на здатність системи відокремлювати цілі у просторі. Окремо передбачається дослідити, у яких діапазонах радіочастот ЛЧМ застосовуються найчастіше та як їхні властивості визначають роздільну здатність і дальність дії радара. Потрібно дослідити, як зміна бази сигналу впливає на похибку визначення координат і ймовірність правильного виявлення об'єкта.

Практична частина завдання стосується апаратної реалізації: використання інтегральної мікросхеми прямого цифрового синтезу AD9910 для генерації ЛЧМ із заданими параметрами частоти, амплітуди та фази, а також застосування ПЛІС Cyclone 10 LP для реалізації алгоритмів FFT, множення спектрів, пошуку пікових значень і IFFT. Це дозволяє оцінити можливості обробки сигналів у реальному часі.

Таким чином, дослідження спрямоване на поєднання математичного моделювання та апаратних рішень з метою створення узагальненої методики використання ЛЧМ у сучасних радіолокаційних системах, що забезпечує точність, завадостійкість і швидкодію.

Виклад основного матеріалу. У процесі аналізу сучасних радіолокаційних систем було вста-

новлено, що вибір типу зондувального сигналу визначає точність і завадостійкість усієї системи виявлення. Лінійно-частотно модульовані (ЛЧМ) сигнали завдяки своїй здатності концентрувати енергію у широкому частотному діапазоні залишаються базовим інструментом для оглядових і спеціалізованих РЛС. Їхня ефективність полягає у високій роздільній здатності при порівняно низькій піковій потужності випромінювання. Разом із тим, у практиці використовується кілька видів ЛЧМ – лінійні, нелінійні, комбіновані та імпульсні. Кожен із них має специфічні характеристики, що по-різному впливають на рівень бічних пелюсток автокореляційної функції, стабільність спектра та здатність протистояти перешкодам. З цієї причини важливим є порівняльний аналіз основних методів модуляції та оцінка їх придатності для різних діапазонів роботи. Додатково слід уточнити параметри тривалості імпульсів ЛЧМ. У практичних системах радіолокації тривалість зондуючих імпульсів зазвичай становить 5–30 мкс, рідше перевищує 40 мкс, з міжімпульсними інтервалами 20–100 мкс. Це означає, що впродовж 1 мс може передаватися до чотирьох моноімпульсів, а тривалість між пакетами імпульсів визначається частотою дискретизації АЦП на ПЛС. Такий режим забезпечує узгодження генерації та прийому сигналів без перекриття імпульсів і гарантує стабільність роботи при високій швидкості оновлення.

На підставі таблиці 1 можна зробити висновок, що нелінійні та комбіновані сигнали забезпечують кращу завадостійкість, тоді як імпульсні ЛЧМ залишаються базою для вимірювання дальності завдяки вузькій головній пелюстці автокореляційної функції.

Математичний опис ЛЧМ-сигналу визначається виразами (1; 2):

$$f(t) = f_0 + \frac{\Delta f}{T}t, 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

$$s(t) = A \cos\left(2\pi f_0 t + \pi \frac{\Delta f}{T} t^2\right) \quad (2)$$

де f_0 – початкова частота, Δf – девіація, T – тривалість імпульсу, A – амплітуда.

База сигналу (3):

$$B = \Delta f \cdot T \quad (3)$$

що визначає роздільну здатність системи.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) (4):

$$|S(f)| = T \cdot \text{sinc}[T(f - f_0)] \quad (4)$$

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) змінюється лінійно від 0 до $2\pi\Delta fT$, а автокореляційна функція (АКФ) (5):

$$R(\tau) = T \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \text{sinc}(B\tau) \quad (5)$$

Для забезпечення коректності порівнянь частотну вісь перераховано у загальноприйнятих одиницях (кГц/МГц/ГГц) з округленням до цілих значень. Такий підхід унеможливує спотворення масштабу й дозволяє точніше порівнювати характеристики сигналів з різними базами.

Оцінка співвідношення сигнал/шум (SNR) показала, що при базі $B = 10^6 \text{ Гц}\cdot\text{с}$ рівень $\text{SNR} \approx 35 \text{ дБ}$, тоді як при $B = 4 \times 10^6 \text{ Гц}\cdot\text{с}$ – близько 47 дБ, що демонструє підвищення завадостійкості з ростом бази.

Моделювання амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик показало, що збільшення часової бази імпульсу дозволяє зменшити ширину головної пелюстки, що безпосередньо підвищує роздільну здатність. Наприклад, при базі сигналу 1000 рівень бічних пелюсток зростає, однак точність вимірювання дальності покращується вдвічі. Це підтверджує необхідність балансування між роздільною здатністю та енергетичною ефективністю.

Аналіз функцій розподілу продемонстрував, що для лінійного ЛЧМ характерна рівномірна енергетична щільність, тоді як для нелінійного спостерігається концентрація у певних ділянках спектра. Це може бути використано для адаптації сигналу під умови роботи – від низькочастотних оглядових систем до високоточних міліметрових радарів.

Таблиця 1

Характеристики основних типів ЛЧМ-сигналів

Вид сигналу	Закон модуляції	Переваги	Недоліки	Типові діапазони
Лінійний	Прямолінійний	Простота генерації, універсальність	Вищий рівень бічних пелюсток	UHF, L, S
Нелінійний	Параболічний, експоненц.	Краще пригнічення бічних пелюсток	Ускладнена синхронізація	C, X
Комбінований	Поєднання кількох законів	Гнучке налаштування під завади	Складна апаратна реалізація	X, Ku
Імпульсний ЛЧМ	Часові імпульси з девіацією	Висока точність вимірювання дальності	Залежність від бази імпульсу	S, X, Ka

Особливу увагу заслуговує імпульсний ЛЧМ, який слугує базовим зондувальним сигналом. Дослідження показало, що збільшення тривалості імпульсу при фіксованій девіації знижує ймовірність правильної детекції цілі, тоді як оптимальне поєднання цих параметрів забезпечує стабільність системи навіть за умов інтенсивних перешкод. На графіках АЧХ, ФЧХ та автокореляційної функції чітко видно, як вибір бази імпульсу впливає на роздільну здатність. На рисунку 1 показано автокореляційну функцію радіоімпульсу з лінійно-частотною модуляцією. Функція має виражену вузьку центральну пелюстку й високочастотні осциляції, частота яких дорівнює ω_0 . При $\tau=0$ АКФ досягає максимального значення, а зі збільшенням τ амплітуда швидко спадає до нуля.

На рисунку 2 показано амплітудно-частотну характеристику лінійно-частотно модульованого (ЛЧМ) сигналу при фіксованій девіації $B=20\text{МГц}$ та різних тривалостях імпульсів $T=10$ і 40мкс . Залежність демонструє, що зі збільшенням тривалості імпульсу ширина спектра звужується, а енергія сигналу зосереджується в центральній частині смуги навколо носійної частоти $f_0=10\text{МГц}$. У той же час коротший імпульс має ширший спектр і забезпечує вищу роздільну здатність. Це означає, що зі збільшенням тривалості імпульсу при незмінній девіації зменшується ширина спектра, проте поліпшується енергетична ефективність і знижується ймовірність спотворення сигналу під дією шумів. Такий компроміс між шириною спектра і стабільністю сигналу визначає опти-

мальний режим роботи радіолокаційної системи при виборі параметрів ЛЧМ-модуляції.

На рисунку 3 показано фазочастотну характеристику лінійно-частотно модульованого (ЛЧМ) сигналу при девіації частоти $B=20\text{МГц}$ та двох різних тривалостях імпульсу – $T=10$ та 40мкс . У варіанті (а) представлено ідеальну параболічну фазову характеристику, яка відповідає рівномірному збільшенню миттєвої частоти з часом. Варіант (б) ілюструє спотворення фази в результаті проходження сигналу через неоднорідне середовище та дії випадкових флуктуацій, що призводить до нерівномірності зміни частоти. Зі зростанням тривалості імпульсу (від 10 до 40 мкс) фазова крива стає плавнішою, нахил зменшується, а стійкість до випадкових відхилень зростає. Це підтверджує зв'язок часових параметрів сигналу з його частотною стабільністю та визначає умови ефективної кореляційної обробки в радіолокаційних системах.

Додатково варто зазначити, що при аналізі фазових залежностей враховується співвідношення сигнал/шум (SNR), яке визначається як відношення квадрату амплітуди корисного сигналу до середньої потужності шуму. Високе значення SNR забезпечує стабільнішу фазову характеристику та зменшує фазові флуктуації, що особливо важливо під час оцінювання точності кореляційного виявлення.

Крім того, деталізується реалізація швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), що виконується на програмованій логічній інтегральній схемі

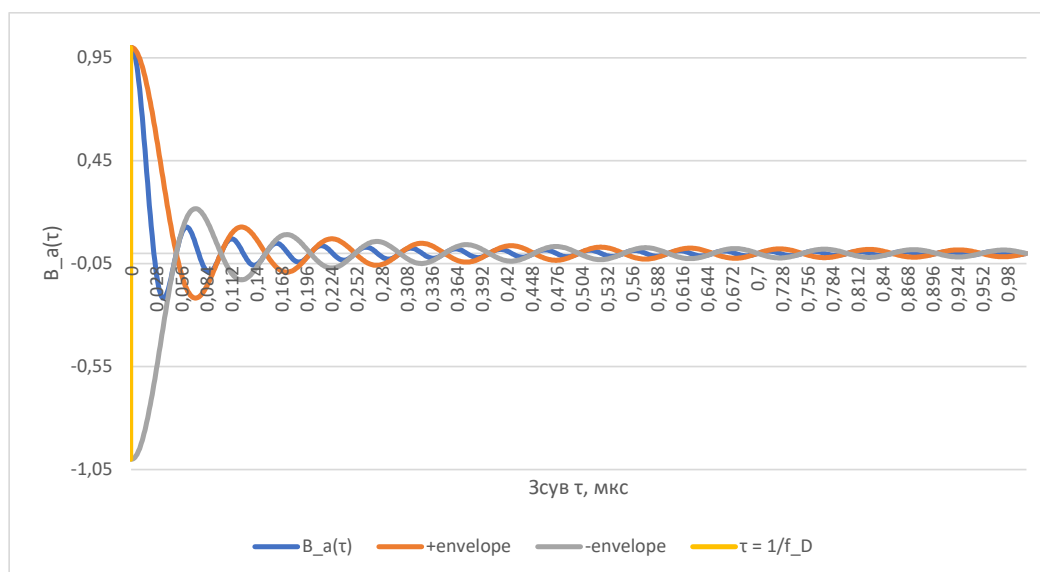
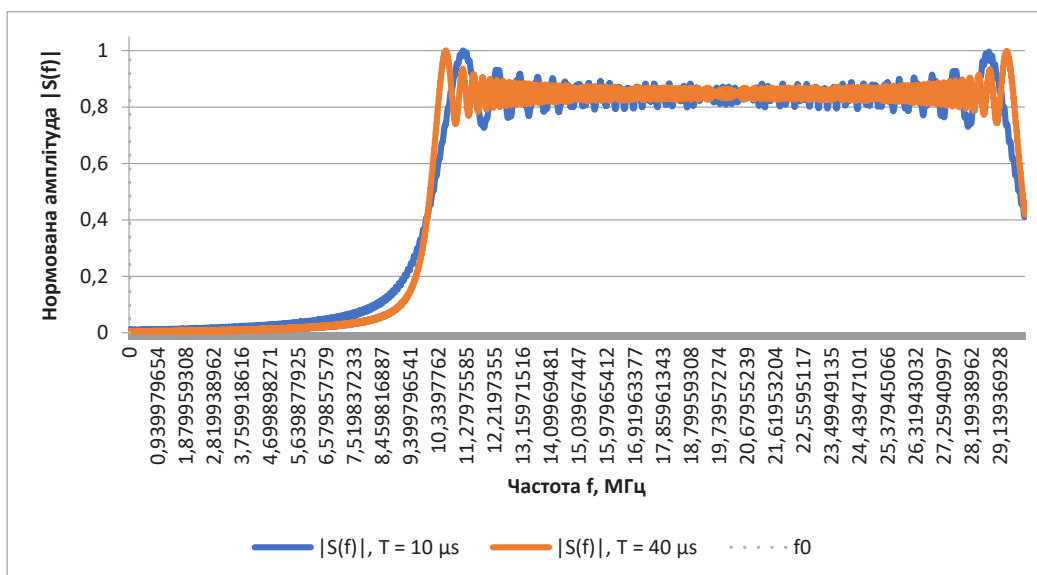
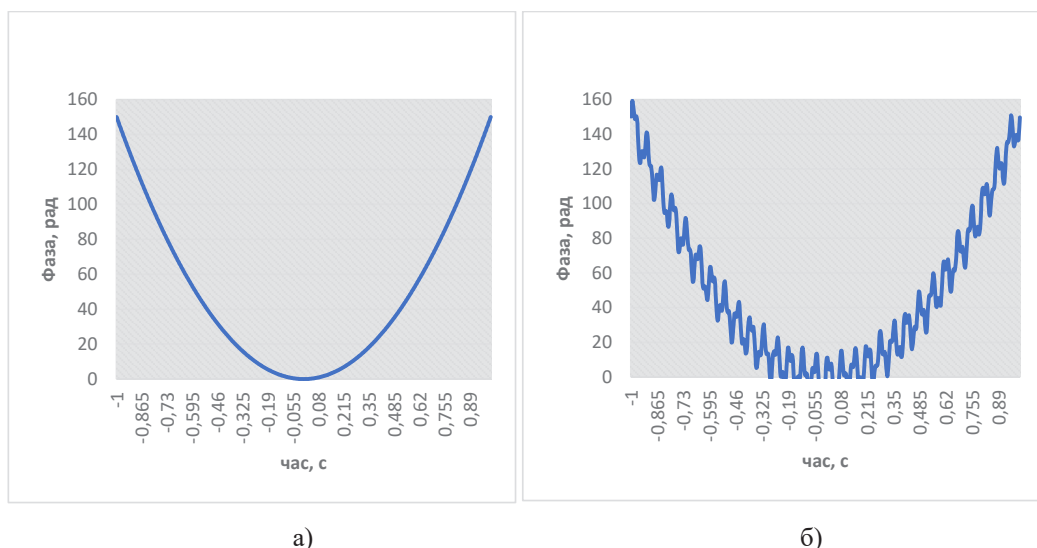


Рис. 1. Автокореляційна функція радіоімпульсу з лінійно-частотною модуляцією ($f_0 = 10\text{МГц}$, $f_D = 20\text{МГц}$, $t_i = 40\text{мкс}$)

Рис. 2. Амплітудно-частотна характеристика ЛЧМ ($B = 20$ МГц; $T = 10/40$ мкс)Рис. 3. Фазочастотна характеристика лінійно-частотно модульованого сигналу:
а – ідеальна параболічна форма фази; б – спотворена характеристика після проходження сигналу
через неоднорідне середовище ($B = 20$ МГц; $T = 10/40$ мкс)

Cyclone 10 LP із використанням потокової архітектури radix-2 (6):

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (6)$$

де N – кількість відліків. Така реалізація забезпечує обробку сигналів у реальному часі при частоті дискретизації до 100 МГц і дозволяє здійснювати миттєвий пошук пікових значень у спектрі.

Моделювання виконано в середовищі MATLAB/OCTAVE, із використанням функцій *fftshift*, *abs*, *angle* та *xcorr*, що забезпечують нормоване представлення спектрів і кореляційних функцій. Такий підхід дозволяє виконати точне порівняння характеристик при різних базах сиг-

налу та перевірити узгодженість фазових і частотних залежностей.

З технічної точки зору генерація ЛЧМ здійснюється за допомогою мікросхеми AD9910, яка підтримує прямий цифровий синтез. Мікроконтролер через інтерфейс SPI задає частоту, фазу та амплітуду, що дозволяє швидко змінювати параметри сигналу. Обробка сигналів реалізується на ПЛІС Cyclone 10 LP, де послідовність дій включає виконання FFT, множення спектрів, пошук пікових значень і застосування IFFT.

З технічної точки зору генерація ЛЧМ здійснюється за допомогою мікросхеми AD9910, яка підтримує прямий цифровий синтез. Мікрокон-

тролер через інтерфейс SPI задає частоту, фазу та амплітуду, що дозволяє швидко змінювати параметри сигналу:

```
// Ініціалізація AD9910 та запуск ЛЧМ
void ad9910_lfm_init(uint32_t f_start, uint32_t
f_stop, uint32_t f_step) {
    ad9910_reset();
    ad9910_write_reg(CFR1, 0x00000000); //
базові налаштування
    ad9910_write_reg(FTW_START, f_start); //
стартова частота
    ad9910_write_reg(FTW_STOP, f_stop); //
кінцева частота
    ad9910_write_reg(FTW_STEP, f_step); //
крок
    ad9910_io_update(); // підтвер-
дження
}
```

Лістинг 1. Фрагмент коду налаштування AD9910 (C)

Обробка сигналів реалізується на ПЛІС Cyclone 10 LP, де послідовність дій включає виконання FFT, множення спектрів, пошук пікових значень і застосування IFFT. Фрагмент коду на Verilog для блоку комплексного множення після FFT може мати вигляд:

```
// Комплексне множення:  $Z = X * conj(Y)$ 
always @(posedge clk) begin
    z_re <= x_re * y_re + x_im * y_im;
    z_im <= x_im * y_re - x_re * y_im;
end
```

Лістинг 2. Фрагмент Verilog-блоку комплексного множення після FFT

Такий алгоритм забезпечує роботу в реальному часі. Аналіз обчислювальних витрат підтвердив, що оптимізовані алгоритми FFT/IFFT на ПЛІС здатні підтримувати обробку сигналів із частотою оновлення у десятки кілогерц без затримок, що критично для систем виявлення швидкісних об'єктів.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що лінійні ЛЧМ залишаються основним інструментом для універсальних РЛС, нелінійні та комбіновані – для умов підвищених завад, а імпульсні – як база для вимірювання дальності й швидкості. Реалізація генерації на AD9910 та

обробки на Cyclone 10 LP підтверджує, що сучасна апаратна база дозволяє вивести ці сигнали на новий рівень точності та надійності.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що лінійно-частотно модульовані (ЛЧМ) сигнали залишаються базовим інструментом сучасної радіолокації завдяки високій роздільній здатності, стійкості до завад і можливості роботи у широкому частотному діапазоні. Порівняльний аналіз різних видів ЛЧМ показав, що лінійні сигнали забезпечують простоту реалізації та універсальність, але мають вищий рівень бічних пелюсток; нелінійні та комбіновані варіанти ефективніше пригнічують завади, проте потребують складнішої синхронізації; імпульсні ЛЧМ слугують основою для вимірювання дальності, де критичною є правильна оптимізація часової бази.

Моделювання амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик підтвердило, що збільшення тривалості імпульсу дозволяє суттєво підвищити роздільну здатність, однак вимагає збереження енергетичної ефективності за рахунок узгодженого вибору девіації. Автокореляційні функції та спектральний аналіз показали чітку залежність точності виявлення від співвідношення між базою сигналу і шириною головної пелюстки.

З технічної точки зору обґрунтовано, що використання мікросхеми AD9910 для генерації ЛЧМ та реалізація алгоритмів обробки на ПЛІС Cyclone 10 LP (FFT/IFFT, множення спектрів, пошук пікових значень) дозволяє створювати радіолокаційні системи, здатні працювати у режимі реального часу без критичних затримок. Це відкриває можливість для виявлення швидкісних повітряних і надводних об'єктів навіть у складних завадових умовах.

Таким чином, поєднання математичного моделювання характеристик ЛЧМ-сигналів із сучасними апаратними рішеннями забезпечує основу для створення компактних і енергоефективних радіолокаційних комплексів нового покоління. Отримані результати можуть бути використані як у військовій, так і в цивільній авіаційній та морській навігації, де точність та завадостійкість систем визначають рівень безпеки та ефективності управління рухом.

Список літератури:

1. Костирич О. О., Гризо А. А., Додух О. М. Комбіновані двофрагментні радіолокаційні сигнали з лінійним та експоненціальним законами частотної модуляції. Системи озброєння і військова техніка. 2023. № 4(76). С. 58–64. <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.76.06>
2. Павлов О. І., Гусєва О. В., Ящишин Є. М., Наритнік Т. М., Сайко В. Г., Авдєєнко Г. Л. Математичне моделювання рухомого FMCW-радару: сигнал на вході приймача. Вісті вищих навчальних закладів. Радіoeлектроніка. 2024. № 67(2). С. 76–90. <https://doi.org/10.20535/S002134702211005X>

3. Milczarek H., Leśnik C., Djurović I., Kawalec A. Estimating the instantaneous frequency of linear and nonlinear frequency modulated radar signals – a comparative study. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 8. P. 2840. <https://doi.org/10.3390/s21082840>
4. Meng S., Meng C., Wang C. Estimation of LFM signal parameters using RD compressed sampling and the DFRFT dictionary. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2023. Vol. 2023, No. 1. P. 93. <https://doi.org/10.1186/s13634-023-01057-4>
5. Mon Y. J. Simulation and implementation of signal processing for LFM radar using DSK 6713. *Electronics*. 2023. Vol. 12, No. 17. P. 3682. <https://doi.org/10.3390/electronics12173682>
6. Swiercz E., Janczak D., Konopko K. Detection of LFM radar signals and chirp rate estimation based on time-frequency rate distribution. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 16. P. 5415. <https://doi.org/10.3390/s21165415>
7. Wang J., Ding M., Yarovoy A. Matrix-pencil approach-based interference mitigation for FMCW radar systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2021. Vol. 69, No. 11. P. 5099–5115. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3090798>
8. Wang J. CFAR-based interference mitigation for FMCW automotive radar systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Vol. 23, No. 8. P. 12229–12238. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3111514>
9. Wang S., Liang D., Chen Y. Photonics-assisted joint communication-radar system based on a QPSK-sliced linearly frequency-modulated signal. *Applied Optics*. 2022. Vol. 61, No. 16. P. 4752–4760. <https://doi.org/10.1364/AO.456287>
10. Xie X., Li J., Xu K., Capmany J., Dai Y. Broadband linear frequency modulation signal compression based on a spectral Talbot effect. *Optics Letters*. 2023. Vol. 48, No. 20. P. 5383–5386. <https://doi.org/10.1364/OL.503157>
11. Cao X., Zhang S., Tan K., Yang J., Lu X., Dai Z., Gu H. Signal processing for novel noise radar based on de-chirp and delay matching. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 22. P. 7169. <https://doi.org/10.3390/s24227169>
12. Engels F., Heidenreich P., Wintermantel M., Stäcker L., Al Kadi M., Zoubir A. M. Automotive radar signal processing: Research directions and practical challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2021. Vol. 15, No. 4. P. 865–878. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3063666>
13. Rao S., Narasimha R., Sun S. Signal processing challenges in automotive radar. *ICASSP 2025–IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2025. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICASSP49660.2025.10889506>

Redko I.V., Tonkohlas Yu.V. ANALYSIS OF LINEAR FREQUENCY MODULATED SIGNALS IN RADAR SYSTEMS

The article presents a comprehensive analysis of linear frequency modulated (LFM) signals, which are widely used in radar systems for the detection of airborne objects. It is shown that LFM represents a fundamental type of probing signal capable of providing high range resolution at relatively low peak transmission power, which makes it effective under modern conditions of congested radio frequency spectrum. Various types of LFM signals are considered—linear, nonlinear, two-segment, as well as pulsed forms. Their key distinctions in terms of spectral shape, sidelobe levels, and interference resistance are identified, which enables the determination of optimal modes of application for specific radar tasks. Mathematical modeling of amplitude-frequency characteristics (AFC), phase-frequency characteristics (PFC), and distribution functions have demonstrated that the choice of signal time-bandwidth product directly affects the accuracy of target detection and the system's ability to separate objects in space. In particular, increasing the time base of a pulse improves range resolution; however, it requires correct adjustment of frequency deviation to maintain energy efficiency. The study provides examples of LFM usage across different frequency ranges and shows that pulsed LFM signals remain the foundation for the design of both surveillance and specialized radars. Particular attention is devoted to hardware solutions: the use of direct digital synthesis (DDS) integrated circuits (specifically AD9910) for generating signals with controlled frequency, amplitude, and phase parameters, as well as the application of FPGAs (Cyclone 10 LP) for implementing real-time algorithms of fast Fourier transform (FFT), spectral multiplication, peak detection, and inverse FFT (IFFT). This enables real-time signal processing with high precision and minimal latency. The obtained results indicate that the combination of advanced digital processing methods with hardware implementation based on DDS and FPGA provides a significant increase in the efficiency of airborne target detection in noisy environments and opens prospects for the development of compact and energy-efficient next-generation radar systems.

Key words: linear frequency modulated signals, radar, interference immunity, pulsed signals, FFT/IFFT, AD9910, Cyclone 10 LP.

Дата надходження статті: 28.10.2025

Дата прийняття статті: 14.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 621.39

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/14>**Рибак А.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Карпенко А.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЕМУЛЯЦІЙНІ СЕРЕДОВИЩА GNS3 ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДІАГНОСТИКИ МЕРЕЖ

Розвиток інформаційних технологій супроводжується зростанням складності комп'ютерних мереж, що забезпечують функціонування сучасної цифрової інфраструктури. Питання ефективного моделювання, тестування та діагностики таких мереж набуває особливої актуальності в умовах упровадження технологій IoT, хмарних обчислень і штучного інтелекту. У статті здійснено аналіз сучасних симуляційних та емуляційних платформ, зокрема Cisco Packet Tracer, GNS3, NS-3, OMNeT++, QualNet, Cooja, Mininet та інших, визначено їхні переваги та обмеження у контексті освітнього й практичного використання. Показано, що, незважаючи на широкі функціональні можливості, більшість із них не мають механізмів автоматичного виявлення конфігураційних помилок та інтелектуального аналізу логів. Відсутність таких інструментів ускладнює процес виявлення аномалій, оптимізації топологій і тестування складних мережеских сценаріїв.

У роботі обґрунтовано доцільність інтеграції технологій штучного інтелекту у середовища мережевого моделювання. Запропоновано концепцію веб-платформи "tolka.lab", створеної на базі Flask, MySQL, GNS3 та GPT-4, яка реалізує інтелектуальний підхід до аналізу логів і автоматичного пояснення результатів роботи мережі. Проведене експериментальне тестування довело, що використання системи tolka.lab дозволяє скоротити час виявлення помилок, підвищити якість кінцевих конфігурацій, знизити кількість повторних помилок та мінімізувати потребу у зовнішніх джерелах інформації.

Отримані результати підтверджують, що впровадження штучного інтелекту у засоби емуляції підвищує ефективність діагностики, навчання й практичного адміністрування мереж. Визначено, що подальший розвиток цього напрямку пов'язаний зі створенням спеціалізованих алгоритмів, здатних враховувати особливості протоколів, динаміку мережеских топологій і специфіку поведінки пристроїв у реальному часі. Розроблена концепція tolka.lab відкриває нові можливості для вдосконалення систем навчання, дослідження та проектування сучасних телекомунікаційних мереж, забезпечуючи їхню надійність, масштабованість і стійкість до збоїв.

Ключові слова: емуляція мереж, симуляція, штучний інтелект, GNS3, Cisco Packet Tracer, мережеве моделювання, tolka.lab, Flask, GPT-4.

Постановка проблеми. Сучасні комп'ютерні мережі стають дедалі складнішими, що потребує ефективних засобів їхнього тестування та діагностики без використання фізичного обладнання. Існуючі симулятори та емулятори, попри широкі функціональні можливості, не забезпечують автоматизованого виявлення помилок і глибокого аналізу конфігурацій. Відсутність інтелектуальних систем у таких середовищах знижує ефективність проектування, навчання та практичного адміністрування мереж. Тому актуальною є розробка інструментів, які поєднують можливості мережевого моделювання та штучного інтелекту для підвищення точності діагностики і якості навчального процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика мережевого моделювання висвітлюється у працях, присвячених використанню симуляторів і емуляторів, таких як Cisco Packet Tracer, NS-3, OMNeT++, QualNet, Mininet, GNS3 тощо [1]. Відомі дослідження зосереджуються на порівнянні функціональності, продуктивності та точності цих інструментів, однак питання автоматизації діагностики залишаються

недостатньо розробленими [1, 2]. Сучасні підходи до використання штучного інтелекту у мережевій сфері здебільшого орієнтовані на аналіз трафіку, виявлення атак або прогнозування навантажень, але майже не охоплюють сферу інтеграції AI у симуляційні та емуляційні середовища. Відсутність універсальних алгоритмів, здатних адаптуватися до особливостей протоколів і динамічної поведінки мережесистем, створює наукову прогалину, яку покликана заповнити дана робота.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та дослідження концепції веб-платформи “tolka.lab”, що інтегрує технології штучного інтелекту з емуляційним середовищем GNS3 для автоматизованого аналізу логів і діагностики мережесистем конфігурацій. Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- провести аналіз сучасних симуляторів та емуляторів комп’ютерних мереж і визначити їхні обмеження;
- обґрунтувати необхідність інтеграції штучного інтелекту у процес діагностики мережесистем;
- розробити архітектуру веб-платформи “tolka.lab” на базі Flask, MySQL, GNS3 та GPT-4;
- здійснити тестування ефективності роботи платформи порівняно з класичним середовищем GNS3;
- оцінити перспективи подальшого розвитку інтелектуальних систем для мережевого моделювання.

Виклад основного матеріалу. Розвиток інформаційних технологій супроводжується ускладненням комп’ютерних мереж, що забезпечують функціонування цифрової інфраструктури, передачу даних та впровадження інноваційних технологій – IoT, хмарних обчислень і штучного інтелекту. Це зумовлює актуальність планування та тестування мереж для гарантування їхньої надійності та продуктивності. Для аналізу роботи мереж використовуються симулятори та емулятори, що дають змогу моделювати топології, тестувати конфігурації й знаходити помилки без фізичного обладнання. Проте сучасні інструменти обмежені в автоматизованій діагностиці та інтеграції інтелектуальних систем, що вимагає нових підходів до моделювання на основі сучасних технологій.

Інструменти моделювання займають ключове місце у тестуванні мереж. Симулятори працюють із математичними моделями та дискретними подіями, що забезпечує можливість відтворення, але знижує реалістичність [3]. Структуровану класифікацію симуляторів наведено на рисунку 1. Емулятори ж працюють із реальним кодом протоколів, використовуючи ресурси операційної сис-

теми для створення мереж, наближених до реальних, хоча їхні можливості залежать від доступних апаратних ресурсів. Структуровану класифікацію емуляторів наведено на рисунку 2.

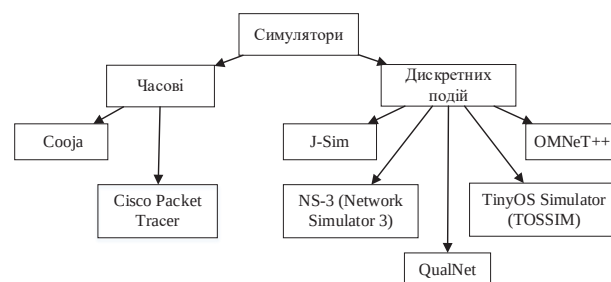


Рис. 1. Класифікація симуляторів мереж

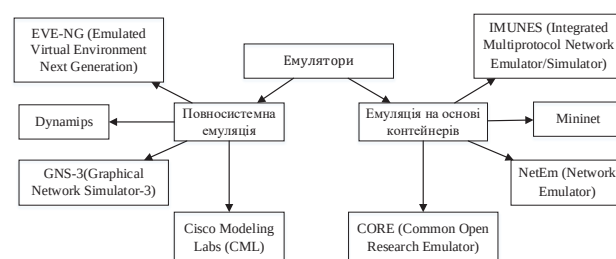


Рис. 2. Класифікація емуляторів мереж

Cisco Packet Tracer (CPT) – середовище для моделювання мереж, IoT і кібербезпеки без фізичного обладнання; використовується у навчанні та підготовці до CCNA/CCNP [4]; NS-3 – симулятор дискретних подій на C++/Python для дослідження мобільних, бездротових, IoT-, 5G- і SDN-мереж та аналізу протоколів [5]; OMNeT++ – об’єктно-орієнтоване середовище моделювання протоколів і розподілених систем, застосовується для складних моделей бездротових, сенсорних, IoT- і 5G-мереж; QualNet – комерційний симулятор для проектування, тестування й оптимізації телекомунікаційної інфраструктури [6]; Cooja – симулятор ОС Contiki для бездротових сенсорних мереж з візуалізацією роботи вузлів; J-Sim – Java-симулятор для дослідження мобільних, сенсорних, супутникових і Mesh-мереж; TOSSIM – симулятор TinyOS, що моделює роботу на низькому рівні для аналізу енергоспоживання й протоколів IoT; GNS3 – безкоштовний емулятор, що працює з образами Cisco IOS/JunOS для побудови віртуальних топологій і тестування конфігурацій [7]; EVE-NG – універсальна платформа для емуляції мереж різних виробників і створення складних гібридних топологій [8]; IMUNES – емулятор на FreeBSD для високоточної симуляції великих мереж і тестування протоколів; CORE – емулятор реального часу для побудови гібридних топологій з віртуальних і фізичних вуз-

лів; Cisco Modeling Labs (CML) – платформа Cisco для моделювання складних мережеских сценаріїв і навчання кібербезпеці [3]; NetEm – Linux-емулятор трафіку для імітації затримок, втрат і інших параметрів мережі; Dynamips – симулятор маршрутизаторів Cisco з реальними IOS-образами; Mininet – легкий емулятор для створення масштабованих мереж і дослідження SDN та нових протоколів.

Симуляційні та емуляційні платформи забезпечують можливість тестування роботи протоколів, пристроїв і сервісів без залучення фізичного обладнання, що особливо важливо як у навчальних цілях, так і для професійної сертифікації та тестування складних мережеских архітектур.

Вибір інструментів симуляції та емуляції є важливим етапом у проектуванні й тестуванні мереж. Порівняння Cisco Packet Tracer і GNS3 є актуальним, оскільки це найбільш поширені інструменти у сфері мережевих технологій. Аналіз проводиться за критеріями: функціональність, точність моделювання, зручність роботи, підтримка протоколів, продуктивність і вимоги до обладнання.

Packet Tracer має навчальну спрямованість: він дозволяє створювати базові топології та налаштовувати основні мережеві сервіси (VLAN, DHCP, DNS, NAT, VPN, IoT), проте відтворює лише логічну модель роботи пристроїв без реальних операційних систем [3]. На відміну від нього, GNS3 використовує повноцінні образи IOS та інших ОС, що забезпечує високий рівень достовірності емуляції маршрутизаторів, комутаторів, серверів і засобів безпеки, а також дає змогу моделювати поведінку мереж під навантаженням і перевіряти сумісність різних платформ. Інтерфейс Packet Tracer характеризується простотою та орієнтований на студентів і початківців, тоді як GNS3 вимагає глибших знань у сфері віртуалізації, але підтримує побудову складних гібридних топологій із застосуванням VMware, Docker чи фізичного обладнання. Packet Tracer реалізує базовий набір протоколів (RIP, OSPF, EIGRP, DHCP, VLAN), тоді як GNS3 забезпечує повноцінну підтримку мережевих стеків Cisco, Juniper, Fortinet, Palo Alto, VyOS і Linux, включно з BGP, MPLS, IPsec VPN та іншими корпоративними технологіями [5]. У продуктивності Packet Tracer демонструє стабільну роботу навіть на малопотужних ПК, тоді як GNS3 значно більш ресурсомісткий і часто потребує серверного чи хмарного середовища. Таким чином, Packet Tracer вирізняється доступністю та простотою, але має суттєві обмеження у точності моделювання та підтримці протоколів. Натомість GNS3 забезпечує професійний рівень емуляції та гнучкість конфігурацій, що робить його придатним

для дослідження складних мережевих інфраструктур, попри більшу складність освоєння та підвищені апаратні вимоги.

Попри стрімкий розвиток засобів моделювання комп'ютерних мереж, проблема ефективної діагностики помилок у симуляційних та емуляційних середовищах залишається актуальною. Навіть сучасні платформи, такі як Cisco Packet Tracer та GNS3, попри широкі можливості, мають обмеження у сфері автоматизованого виявлення та аналізу помилок під час налаштувань або моделювання аварійних сценаріїв [12].

Головним недоліком Cisco Packet Tracer є спрощена симуляція, що ґрунтується на програмному відтворенні логіки пристроїв. Через це частина конфігураційних помилок не виявляється, оскільки не всі процеси мережевого обладнання моделюються повністю. CLI містить індикатор синтаксичних помилок, який підкреслює некоректні команди (рис. 3), однак інструменти візуалізації трафіку та система перевірки завдань спрямовані переважно на базові команди й не забезпечують глибокий аналіз налаштувань.

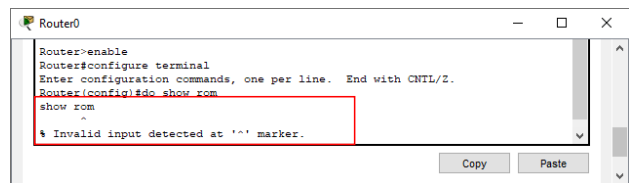


Рис. 3. Індикатор помилок в Command Line Interface

У GNS3, попри емуляцію реальних операційних систем і повну підтримку протоколів, процес діагностики залишається складним. Система не має механізмів автоматичного виявлення конфігураційних помилок, тому користувач самостійно перевіряє сервіси, аналізує журнали та застосовує стандартні команди (show, debug, ping, traceroute). У складних топологіях це вимагає високої кваліфікації та значних часових витрат. Приклад такого аналізу наведено на рис. 4, де GNS3 використовує реальний образ Cisco IOS.

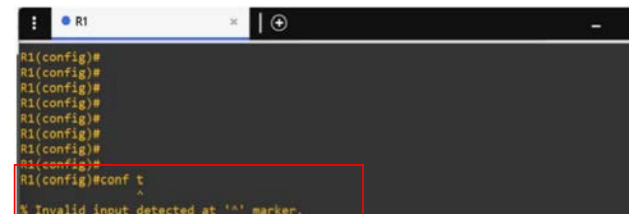


Рис. 1. Індикатор помилок в GNS3 з підтримкою образу Cisco IOS

Додатковим ускладненням є відсутність комплексної моделі моделювання низькорівневих мере-

жевих проблем, таких як затримки, втрати пакетів, перевантаження каналів, вплив QoS-політик або деградація продуктивності при аваріях. Через це інженери не завжди можуть перевірити поведінку мережі в екстремальних або нестандартних умовах до її впровадження. Окремо варто наголосити на відсутності інтеграції інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Більшість емуляторів не використовують алгоритми штучного інтелекту, які могли б аналізувати топології, виявляти типові помилки, пропонувати оптимальні налаштування чи попереджати про ризики. Наявність таких інструментів значно полегшила б роботу мережеских інженерів.

Застосування ІІІ могло б забезпечити автоматичну перевірку логіки налаштувань протоколів, розпізнавання конфігураційних помилок, оптимізацію топологій за критеріями продуктивності й безпеки, моделювання роботи мережі в аварійних сценаріях і раннє виявлення вразливостей під час зростання навантаження. Втім, інтеграція ІІІ у мережеві емулятори потребує спеціалізованих алгоритмів, адаптованих до специфіки протоколів та динаміки мережевої взаємодії. Нині відсутні готові модулі, які можна безпосередньо підключити до GNS3 чи Cisco Packet Tracer. Більшість open-source рішень орієнтовані на обробку тексту, зображень або даних, але не на мережеві сценарії. Тому створення інтелектуальної діагностичної системи потребує власних моделей ІІІ, здатних аналізувати мережеву поведінку, виявляти аномалії та оптимізувати конфігурації. Для реалізації такого підходу була розроблена веб-платформа “tolka.lab”, яка побудована на основі мікрофреймворка для вебдодатків – Flask, який створений на основі мови програмування Python [9]. Завдяки даному фреймворку, ми змогли побудувати гнучку та просту веб-платформу з можливістю масштабування та підключення зовнішніх сервісів.

Основною задачею платформи є забезпечення користувачів зручним інтерфейсом для реєстрації та входу в систему, управління персональними профілями, публікацією постів на тематику мереж, а також для інтеграції з системою віртуалізації мережеских топологій GNS3 та автоматичного аналізу логів за допомогою інтегрованої моделі штучного інтелекту.

Архітектура системи відповідає класичній моделі «клієнт–сервер–база даних» із використанням зовнішніх API-сервісів (рис. 5). Клієнтська частина реалізована у вигляді веб-інтерфейсу, що взаємодіє із сервером через HTTPS із використанням SSL-сертифікатів. Для її побудови засто-

совано HTML5, CSS3 та JavaScript [10]. Серверна частина представлена застосунком на Flask, який обробляє HTTP-запити, формує веб-сторінки та забезпечує доступ до бази даних. У серверній логіці використано Python 3 та відповідні бібліотеки: flask (маршрутизація, сесії, шаблони), flask_mysql (інтеграція з MySQL), g4f.client (взаємодія з моделями GPT-4), hashlib (хешування), datetime, os, werkzeug.utils (безпечна обробка файлів), MySQLdb.cursors (словникові результати SQL-запитів), base64 (кодування), requests (зовнішні API-запити), gc (очищення логів після AI-обробки). База даних – реляційна система управління базами даних MySQL, у якій зберігаються усі ключові дані для входу користувачів в систему, відображення постів та проєктів. Розроблена на основі phpmyadmin (рис. 6). Файлова система використовується для зберігання завантажених зображень. Інтегровані зовнішні сервіси: GNS3 Server API – для роботи з мережевими топологіями, та GPT-4 (через g4f.client) – для автоматизованого генерування пояснень логів [11].

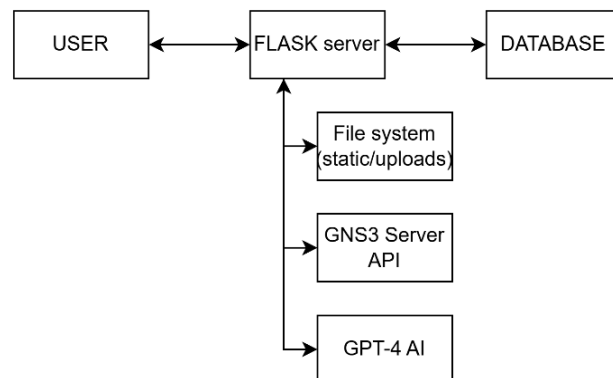


Рис. 5. Архітектура системи

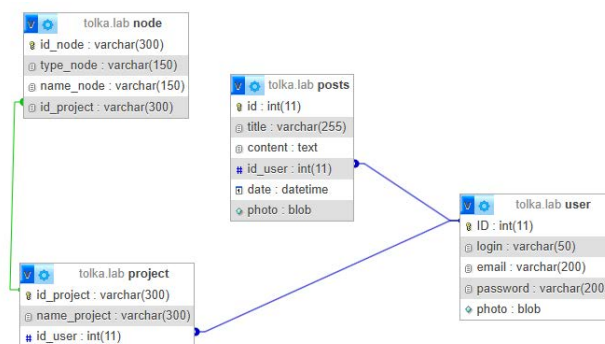


Рис. 6. Схема даних БД “tolka.lab”

У системі реалізовано комплекс механізмів безпеки. Паролі зберігаються у вигляді SHA-256 хешів, що унеможливує їх відновлення у разі компрометації. Цілісність і конфіденційність сесій забезпечує секретний ключ Flask. Під час завантаження файлів перевіряється їх тип, що запобігає

розміщенню шкідливого контенту. Передавання даних між клієнтом і сервером відбувається через захищене SSL-з'єднання.

Веб-платформа підтримує реєстрацію та автентифікацію користувачів: під час створення облікового запису пароль хешується, а під час входу відбувається перевірка логіна та хешу. Користувач може переглядати й оновлювати дані профілю, змінювати аватар (що зберігається у форматі Base64) та оновлювати пароль. Платформа дозволяє створювати та переглядати публікації, що містять заголовок, текст і додаткові медіа. Усі матеріали зберігаються в базі даних із зазначенням автора. Окремий модуль забезпечує роботу з мережевими проєктами через інтеграцію з GNS3: система отримує перелік проєктів, завантажує дані про вузли та передає логи моделі GPT-4, яка формує автоматизовані пояснення щодо стану мережевої інфраструктури.

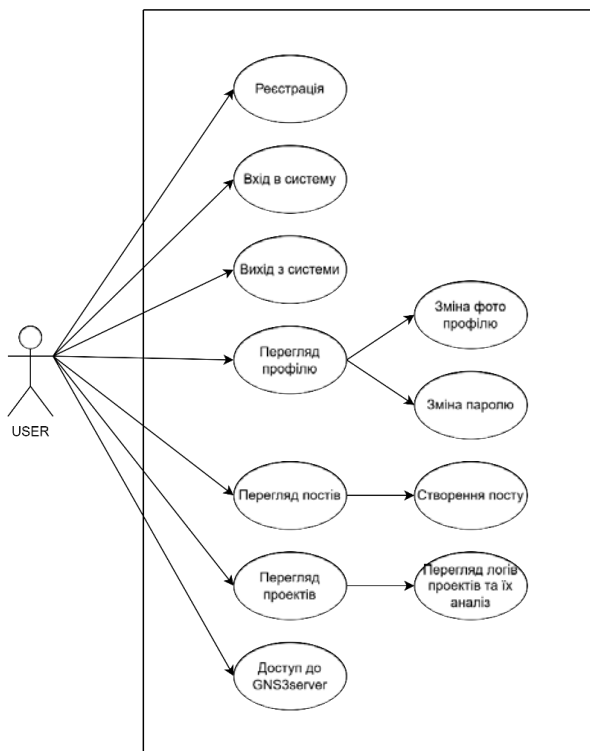


Рис. 7. Use-case діаграма користувача веб-платформи

Для оцінювання функціональності та працездатності розробленої веб-платформи її необхідно розгорнути на Ubuntu 24.04 Desktop (або Ubuntu Server; Desktop обрано для зручності роботи з інструментами розробки). Попередньо створюється віртуальне середовище у Oracle VirtualBox з використанням ISO-образу ОС. Використання віртуалізації забезпечує ізоляцію середовища, контрольовані умови тестування та зменшення впливу зовнішніх чинників.

Після налаштування віртуальної машини, розпочинаємо встановлювати програмні пакети, але перед цим обов'язково оновити існуючі системні пакети для забезпечення актуальності програмного забезпечення та усунення потенційних вразливостей, використовуючи наступні команди:

```
apt update && sudo apt upgrade -y
```

```
apt install mc nano apache2 nginx mysql-server python3 python3-pip python3-venv git php php-cli php-json php-gd php-ldap php-odbc php-pear php-xml php-xmllrpc php-mbstring php-snmp php-soap php-zip php-imap php php-fpm libapache2-mod-php php-mysql mariadb-server phpmyadmin -y
```

З метою забезпечення шифрованого з'єднання HTTPS налаштовується Apache на порту 8080. Для цього редагуємо файл `/etc/apache2/ports.conf`. Змінюємо `Listen 80` на `Listen 8080`. Також у файлі `/etc/apache2/sites-available/000-default.conf` змінюємо `<VirtualHost *:80>`. Встановлюється Stunnel (`apt install stunnel -y`), який працює як SSL-проксі, забезпечуючи шифрування трафіку. SSL-сертифікати створюються командою `openssl req -newkey rsa:8192 -x509 -sha256 -days 365 -nodes -out cert.pem -keyout cert.pem`.

Після запуску служби баз даних `systemctl start mariadb` проводиться її базова безпечна конфігурація (`mysql_secure_installation`) – задається пароль адміністратора, видаляються анонімні користувачі, забороняється віддалений root-доступ тощо. Перезапускається веб-сервер `systemctl restart nginx`, після чого phpMyAdmin доступний за HTTPS-адресою.

Після встановлення необхідних компонентів створюється структура проєкту. Веб-платформа розташовується в системному каталозі `/var/www/tolka`, який прийнято використовувати для зберігання веб-застосунків у більшості Linux-систем.

Для ізоляції залежностей проєкту та зручності розробки створюється віртуальне середовище за допомогою команди `python3 -m venv venv`. Команда створює окремий інтерпретатор Python з незалежними бібліотеками, що дозволяє уникнути конфліктів версій пакетів у глобальній системі. Активація віртуального середовища здійснюється командою `source venv/bin/activate`. Після активації всі встановлення бібліотек через `pip` будуть виконуватись у межах цього віртуального середовища.

Створюється файл `app.py`, в якому буде прописано backend веб-платформи.

Також створюються SSL-сертифікати для Flask, які підключаються безпосередньо в самому коді файлу `app.py`.

```
mkdir ~/ssl
cd ~/ssl
```



```
openssl genpkey -algorithm RSA -out server.key
openssl req -new -key server.key -out server.csr
openssl x509 -req -in server.csr -signkey server.
key -out server.crt
```

Для безпосереднього написання та супроводу програмного коду використовується середовище розробки Visual Studio Code (VS Code). Це сучасний багатофункціональний редактор, що підтримує численні розширення, інтеграцію з системами контролю версій, дебагінг, автодоповнення коду та багато інших функцій, що підвищують продуктивність розробника.

Для моделювання комп'ютерних мереж та отримання логів у межах практичного дослідження був використаний open source емулятор мережевого програмного забезпечення GNS3. Для його встановлення в систему було використано наступні команди:

```
apt update && sudo apt upgrade -y
add-apt-repository ppa:gns3/ppa
apt update
apt install gns3-server gns3-gui -y
```

У процесі інсталяції система може вимагати підтвердження встановлення залежностей – на всі підтвердження дається відповідь YES. Для перевірки успішної інсталяції виконується команда перегляду версій серверної та клієнтської частин:

```
gns3server --version
gns3 --version
```

Після встановлення створюється конфігураційна директорія для серверної частини GNS3:

```
mkdir -p ~/.config/GNS3
```

У даному каталозі створюється файл конфігурації сервера `gns3_server.conf`:

```
nano ~/.config/GNS3/gns3_server.conf
```

У файл конфігурації вносяться наступні параметри:

```
[Server]
host = 0.0.0.0
port = 3080
local = false
auth = false
console_start_port_range = 5000
console_end_port_range = 10000
```

Після цього запускається сервер GNS3 з вказаною конфігурацією:

```
gns3server -config ~/.config/GNS3/gns3_server.conf
```

Таким чином, було успішно розгорнуто та налаштовано локальне серверне оточення для емуляції та моделювання мережевих сценаріїв у середовищі GNS3.

Після написання backend та frontend та підключення всіх зовнішніх залежностей, ми можемо

протестувати веб-платформу.

Під час тестування участь взяли 10 респондентів, умовно поділених на дві рівні групи по 5 осіб. Кожен учасник мав базові навички роботи з GNS3 та однаковий рівень підготовки. Перша група працювала з GNS3, виконуючи конфігурування мережевої топології, аналіз логів вручну та усунення типових помилок. Друга група виконувала аналогічні завдання, але в середовищі `tolka.lab`, яка надавала пояснення щодо поточного стану мережі та вказувала на можливі джерела проблем. Результати оцінки за основними параметрами представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати тестування

Параметр оцінки	GNS3	tolka.lab
Середній час виявлення помилок (хв)	11,2	4,6
Кількість допущених повторних помилок	7	2
Якість фінальної конфігурації (макс. 10 балів)	6,4	9,1
Суб'єктивна оцінка зручності (від 1 до 5)	3,0	4,8
Потреба в додатковому пошуку в інтернеті	Висока (усі учасники)	Мінімальна (1 учасник)

Отримані результати підтверджують підвищення ефективності роботи в середовищі `tolka.lab`. Автоматизований аналіз логів зменшив час діагностики, підвищив якість конфігурацій та зручність роботи завдяки інтеграції з GNS3 і використанню моделей GPT. Тестування показало, що застосування ІІІ в емуляційних платформах підвищує продуктивність, зменшує кількість критичних помилок, покращує практичні навички та знижує залежність від зовнішніх джерел, що забезпечує `tolka.lab` перевагу над традиційним GNS3 у навчальних і прикладних завданнях.

Розроблена платформа, що поєднує Flask, GNS3 та GPT-4, забезпечує інтелектуальний аналіз логів і формування текстових пояснень стану мережі, частково усуваючи недоліки класичних емуляторів. За результатами тестування користувачі `tolka.lab` продемонстрували швидше виявлення помилок, меншу кількість повторних неточностей, кращу якість фінальних конфігурацій та вищу суб'єктивну зручність роботи [13].

Водночас встановлено, що подальша інтеграція ІІІ в мережеве моделювання потребує розробки алгоритмів, здатних враховувати специфіку протоколів і динамічні зміни топологій. Це визначає перспективний напрям розвитку інструментів

моделювання, навчання й тестування.

Висновки. У результаті проведеного дослідження проаналізовано сучасні симуляційні та емуляційні інструменти моделювання комп'ютерних мереж, зокрема Cisco Packet Tracer, GNS3, NS-3, OMNeT++, QualNet, Cooja, Mininet та інші. Встановлено, що, попри високий рівень функціональності, жоден із розглянутих інструментів не забезпечує повноцінної автоматизованої діагностики конфігураційних помилок і не інтегрує інтелектуальні алгоритми для аналізу мережесих процесів. Це обмежує їх застосування у складних сценаріях тестування та навчальних середовищах.

Запропоновано новий підхід до підвищення ефективності моделювання мереж шляхом інтеграції технологій штучного інтелекту в емуляційні платформи. Реалізована веб-платформа "tolka.lab", створена на базі Flask, MySQL, GNS3 та GPT-4, продемонструвала практичну ефективність у задачах автоматичного аналізу логів та пояснення станів мережесих топологій.

Результати експериментального тестування засвідчили, що використання "tolka.lab" дозволяє скоротити середній час виявлення помилок більш ніж удвічі, підвищити якість фінальних конфігурацій, зменшити кількість повторних помилок і мінімізувати залежність користувачів від зовнішніх джерел інформації.

Отримані результати підтверджують перспективність впровадження штучного інтелекту у процес моделювання та навчання мережесих технологій. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку спеціалізованих алгоритмів ШІ, здатних аналізувати поведінку складних топологій у реальному часі, прогнозувати відмови та автоматично оптимізувати конфігурації. Реалізація таких рішень сприятиме створенню нового покоління інтелектуальних систем мережесих моделювання, що поєднуюватимуть точність емуляції, гнучкість налаштувань і високий рівень автоматизації.

Список літератури:

1. Gomez J., Kfoury E. F., Crichigno J., Srivastava G. A Survey on Network Simulators, Emulators, and Testbeds used for Research and Education: *Computer Networks*. 2023. Vol. 237. Art. 110054. DOI: 10.1016/j.comnet.2023.110054.
2. Ergün S. A survey on how network simulators serve reinforcement learning: *Computer Networks*. 2023. Vol. 234. Art. 109934. DOI: 10.1016/j.comnet.2023.109934.
3. Tufail M., Javaid N., Khan Z. A. Teaching Computer Networks using Cisco Packet Tracer: *International Journal of Modern Education and Computer Science*. 2020. Vol. 12, No 5. P. 1–10.
4. Cisco Networking Academy. Introduction to Networks v7.0. Cisco Press, 2021. P. 420.
5. ns-3: A Discrete-Event Network Simulator for Internet Systems. URL: <https://www.nsnam.org>.
6. Qualnet. Une entreprise canadienne qui se consacre à l'installation et à l'entretien d'infrastructures de réseaux sans fil, ainsi qu'à la construction des structures associées. URL: <https://qualnet.ca/en/>.
7. GNS3 Documentation. GNS3 official user guide. URL: <https://docs.gns3.com>.
8. EVE-NG. Official website of the network emulation tool. URL: <https://www.eve-ng.net>.
9. Flask. Encyclopedic Dictionary of Archaeology. Cham, 2021. P. 484. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58292-0_60201
10. Oleshchenko L. M. Fundamentals of Web Programming. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021. P. 138.
11. Gaithersburg. National Institute of Standards and Technology. 2023. P. 96. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/AI/NIST.AI.100-1.pdf>.
12. Карпенко А., Толстова А. Сучасний стан та перспективи розвитку емуляторів мереж. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції "Кібербезпека державних інституцій та подолання кризових станів" (Том 1), м. Київ, 14 листопада 2024 р. Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 337–338.
13. Карпенко А., Толстова А. Особливості застосування засобів моделювання мереж. Матеріали VIII науково-практичної конференції "Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-комунікаційних систем", м. Київ, 18 червня 2025 р. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 348–349.

Rybak A.V., Karpenko A.O. INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO GNS3 EMULATION ENVIRONMENTS FOR AUTOMATED NETWORK DIAGNOSTICS

The development of information technologies is accompanied by an increase in the complexity of computer networks that support the functioning of modern digital infrastructure. The issue of effective modelling, testing, and diagnostics of such networks is becoming particularly relevant in the context of the introduction of IoT technologies, cloud computing, and artificial intelligence. The article analyses modern simulation and emulation platforms, including Cisco Packet Tracer, GNS3, NS-3, OMNeT++, QualNet, Cooja, Mininet and

others, and identifies their advantages and limitations in the context of educational and practical use. It is shown that, despite their wide range of functionalities, most of them do not have mechanisms for automatic detection of configuration errors and intelligent analysis of logs. The lack of such tools complicates the process of detecting anomalies, optimising topologies and testing complex network scenarios.

The paper justifies the feasibility of integrating artificial intelligence technologies into network modelling environments. It proposes the concept of the tolka.lab web platform, created on the basis of Flask, MySQL, GNS3 and GPT-4, which implements an intelligent approach to log analysis and automatic explanation of network performance results. Experimental testing has proven that using the tolka.lab system reduces error detection time, improves the quality of final configurations, reduces the number of repeat errors, and minimises the need for external sources of information.

The results confirm that the introduction of artificial intelligence into emulation tools increases the efficiency of diagnostics, training, and practical network administration. It has been determined that further development in this area is linked to the creation of specialised algorithms capable of taking into account the characteristics of protocols, the dynamics of network topologies and the specific behaviour of devices in real time. The developed concept of tolka.lab opens up new opportunities for improving the systems of training, research, and design of modern telecommunications networks, ensuring their reliability, scalability, and resistance to failures.

Key words: *network emulation, simulation, artificial intelligence, GNS3, Cisco Packet Tracer, network modelling, tolka.lab, Flask, GPT-4.*

Дата надходження статті: 29.11.2025

Дата прийняття статті: 18.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/15>**Сайко В.Г.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Наритник Т.М.Спільне підприємство «Інститут електроніки та зв'язку
Української академії наук національного прогресу»**Радзівілов Г.Д.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Станілога О.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ У ТЕРАГЕРЦОВИХ РАДІОДАТЧИКАХ НА ОСНОВІ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

У статті представлено результати дослідження та розроблення узагальненої програмно-аналітичної моделі для оброблення FMCW-сигналів у терагерцовому діапазоні частот, що дозволяє забезпечити високу точність оцінювання дальності та просторових параметрів об'єктів у сенсорних і комунікаційних системах нового покоління. Актуальність роботи зумовлена зростаючим інтересом до застосування THz-діапазону в бездротових мережах та безконтактних системах спостереження, де класичні радіотехнічні підходи втрачають ефективність через високий рівень поглинання та дисперсії сигналів. Метою дослідження є створення методики, яка забезпечує синтез математичного моделювання FMCW-сигналів та аналізу реальних вимірювань IQ-даних із використанням спектроаналізатора Spectran V6 у поєднанні із засобами цифрової обробки сигналів у MATLAB. Запропонований підхід включає застосування швидкого перетворення Фур'є (FFT), інтерполяційних методів визначення пікових компонент та фазового уточнення оцінки дальності, що дозволяє мінімізувати помилки ідентифікації частотної модуляції та фазових зсувів у середовищі із суттєвими втратами. Отримані результати експериментальної апробації показали, що комбіноване використання частотного і фазового аналізу дозволяє знизити середньоквадратичну похибку визначення дальності більш ніж удвічі порівняно з базовими спектральними методами, які не враховують фазову інформацію. Додатково проведено оцінювання впливу атмосферного поглинання, температурної нестабільності та параметрів антенних трактів на загальну точність вимірювання. Практична значущість запропонованої методики полягає в можливості її використання для калібрування FMCW-сенсорів терагерцового діапазону, створення навчально-лабораторних комплексів для інженерної підготовки, а також у розробленні нових безконтактних систем моніторингу об'єктів у реальному часі. Методика може виступати основою для подальшого впровадження адаптивних алгоритмів обробки та методів машинного навчання для підвищення точності оцінок у динамічно змінних умовах середовища.

Ключові слова: FMCW-сигнал, терагерцовий сенсор, спектральний аналіз, MATLAB, Spectran V6, інтерполяція, фазове уточнення, IQ-дані.

Постановка проблеми. Терагерцовий (ТГц) діапазон електромагнітного спектра, що охоплює частоти від 0.1 до 10 ТГц, відкриває унікальні можливості для створення високоточних

сенсорних систем, неруйнівного контролю, безконтактних вимірювань і безпечного сканування об'єктів. Сучасні тенденції розвитку терагерцової техніки зосереджені на мініатюризації радіо-

одатчиків та підвищенні ефективності цифрової обробки сигналів. Особливої актуальності набувають радіодатчики на основі FMCW-сигналів (Frequency Modulated Continuous Wave), які забезпечують одночасне визначення відстані та швидкості об'єкта.

Проблема підвищення точності вимірювань у таких системах пов'язана з низкою факторів – зокрема, нелінійністю модуляції, фазовими спотвореннями, шумами приймача та обмеженою роздільною здатністю перетворювачів. Тому зростає потреба у використанні адаптивних алгоритмів цифрової обробки сигналів, які забезпечують покращення співвідношення сигнал/шум, фазову корекцію, підвищення точності вимірювання дальності та стабільність роботи в широкому динамічному діапазоні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками відзначається значний прогрес у створенні терагерцових сенсорних систем. Роботи [1–3] присвячені розробці мініатюрних FMCW-радарів із високою частотною лінійністю та низьким рівнем фазових шумів. У дослідженнях [4–6] запропоновано методи компенсації нелінійності частотної розгортки, що базуються на цифровій фазовій корекції та використанні опорних еталонних сигналів. Згідно з [7–9], застосування алгоритмів *matched filtering* і *phase refinement* забезпечує зменшення похибки оцінки дальності до 20–30 % порівняно зі стандартними FFT-методами.

Дослідження у [10–12] демонструють ефективність використання адаптивних методів цифрової обробки – зокрема фільтрації Вінера, LMS-та RLS-алгоритмів – для зниження рівня шуму та компенсації нестабільностей у терагерцових системах. Водночас, у [13–18] розглянуто інтеграцію штучних нейронних мереж і методів машинного навчання для адаптивного налаштування порогів детекції, що значно підвищує чутливість та селективність сенсорів.

Однак попри суттєві досягнення, питання адаптивного підвищення точності FMCW-радіодатчиків у терагерцовому діапазоні залишається відкритим. Потребують подальшого дослідження питання розробки комплексних алгоритмів цифрової обробки, які поєднують фазову, частотну та часову адаптацію для одночасного зменшення похибок та покращення метрологічних характеристик.

Постановка завдання. У сучасних інформаційно-вимірювальних системах зростає потреба у підвищенні точності, швидкодії та завадостій-

кості під час визначення просторових параметрів об'єктів. Особливу увагу приділяють терагерцовому (ТГц) діапазону, який забезпечує високу роздільну здатність при малих довжинах хвиль і має перспективи застосування в безконтактних сенсорних технологіях, системах безпеки, медичній діагностиці та телекомунікаціях нового покоління.

Разом із тим, ефективна обробка сигналів у ТГц-діапазоні вимагає нових методичних підходів до виявлення, фільтрації та аналізу спектрально-часових характеристик. Класичні алгоритми радіолокаційної обробки (наприклад, на основі перетворення Фур'є або кореляційних методів) часто не забезпечують достатньої точності в умовах високого рівня шумів, нестабільності частоти генератора та нелінійних спотворень каналу.

У зв'язку з цим виникає наукова задача розроблення методики цифрової обробки терагерцового FMCW-сигналу, яка забезпечує:

- підвищення точності визначення відстані до об'єкта за рахунок поетапного вдосконалення процесів демодуляції, спектрального аналізу та фазового уточнення;
- зменшення похибки визначення частоти побічних компонент за наявності шуму та відбиттів;
- інтеграцію алгоритмів цифрової фільтрації, пікової інтерполяції та узгодженого фільтрування у єдину структурно-алгоритмічну модель;
- можливість подальшої реалізації методики в апаратному середовищі мініатюрного радіодатчика.

Таким чином, **метою дослідження** є створення методики цифрової обробки терагерцового FMCW-сигналу, що дозволяє підвищити точність вимірювання відстані до об'єкта та покращити співвідношення сигнал/шум у системах терагерцового діапазону.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **основні задачі**:

1. Проаналізувати існуючі методи цифрової обробки FMCW-сигналів і визначити їх обмеження в терагерцовому діапазоні.
2. Розробити поетапну методику, що включає процедури *de-chirp*, FFT-аналізу, пікової інтерполяції, фазового уточнення та узгодженого фільтрування.
3. Провести моделювання та оцінити вплив параметрів сигналу (діапазону частот, тривалості імпульсу, рівня шуму) на точність вимірювання.
4. Обґрунтувати доцільність використання розробленої методики для створення мініатюр-

ного терагерцового радіодатчика з адаптивною цифровою обробкою сигналів.

Виклад основного матеріалу.

Методика обробки FMCW-сигналу та її програмна реалізація в MATLAB

Розроблена методика призначена для цифрової обробки сигналів терагерцового FMCW-сенсора з метою точного визначення відстані до об'єктів. Вона реалізує повний цикл перетворень від формування переданого сигналу до отримання уточнених результатів вимірювання, включаючи етапи моделювання, спектрального аналізу, інтерполяції та фазового уточнення.

Загальна структура методики

Методика складається з п'яти основних етапів. На першому етапі формується модель переданого сигналу з лінійною частотною модуляцією (чірпом), який змінює частоту в межах заданої смуги. Після відбиття від об'єкта формується прийнятий сигнал, який містить інформацію про затримку, а отже – про відстань до цілі.

Другий етап полягає у демодуляції прийнятого сигналу методом *de-chirp*. Для цього переданий і прийнятий сигнали перемножуються, що дозволяє отримати низькочастотний інтерференційний сигнал (так званий *beat-сигнал*). Його частота прямо пропорційна відстані до об'єкта, тому подальший аналіз цього сигналу забезпечує оцінку дальності.

Третій етап передбачає спектральну обробку отриманого *beat-сигналу* за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Визначається положення максимуму амплітудного спектра, яке відповідає частоті інтерференції. На основі цієї частоти обчислюється попередня оцінка відстані до об'єкта.

На четвертому етапі застосовується інтерполяційне уточнення, що дозволяє підвищити точність визначення частоти максимуму спектра. Для цього враховуються сусідні спектральні відліки навколо піка, на основі яких виконується уточнення положення максимуму. Це забезпечує підвищення роздільної здатності вимірювань без збільшення кількості відліків або смуги сигналу.

П'ятий етап – фазове уточнення результатів. На цьому етапі аналізується фазова складова сигналу, що дозволяє виявляти дуже малі зміни відстані, які неможливо помітити лише за амплітудним спектром. Поєднання частотного та фазового аналізу дозволяє досягти субміліметрової точності при моделюванні та реальних вимірюваннях.

Математична модель реалізації методики

Розроблена методика спрямована на підвищення точності вимірювання відстані до об'єктів

за допомогою терагерцового FMCW-сенсора шляхом поєднання класичних та уточнених алгоритмів цифрової обробки сигналів. Основна ідея полягає у формуванні синтетичного FMCW-сигналу, його демодуляції методом *de-chirp*, подальшому спектральному аналізу та використанні процедур інтерполяції та фазового уточнення для підвищення роздільної здатності вимірювань. Методика реалізує повний цикл цифрової обробки сигналу, що включає п'ять етапів [19–24]:

Генерація випромінюваного FMCW-сигналу.

Передаваний сигнал формується як:

$$S_{tx}(t) = \cos \left(2\pi \left(f_c t + \frac{B}{2T_{chirp}} t^2 \right) \right) \quad (1)$$

де

f_c – центральна частота,

B – девіація частоти,

T_{chirp} – тривалість одного чірпу.

Відбитий сигнал з урахуванням затримки $\tau = \frac{2R}{c}$ описується виразом:

$$S_{rx}(t) = \cos \left(2\pi \left(f_c(t - \tau) + \frac{B}{2T_{chirp}}(t - \tau)^2 \right) \right) \quad (2)$$

де R – відстань до цілі, c – швидкість світла.

Операція *de-chirp* (гетеродинування).

Множення переданого та прийнятого сигналів:

$$s_{mix}(t) = s_{tx}(t) s_{rx}(t), \quad (3)$$

що призводить до утворення низькочастотного інтерференційного сигналу (*beat-signal*) з частотою:

$$f_b = \frac{2BR}{cT_{chirp}} \quad (4)$$

Саме ця частота прямо пропорційна відстані до об'єкта.

Спектральний аналіз сигналу (FFT-аналіз).

Виконується швидке перетворення Фур'є для визначення амплітудного спектра *beat-сигналу*. Позиція піка у спектрі відповідає f_b , а отже – виміряній відстані:

$$R_{FFT} = \frac{cT_{chirp}}{2B} f_b \quad (5)$$

Інтерполяційне уточнення.

Для підвищення точності оцінки пікової частоти застосовується параболічна інтерполяція навколо максимуму спектра:

$$f_{interp} = f_{b,max} + \frac{y_{-1} - y_{+1}}{2(y_{-1} - 2y_0 + y_{+1})} \quad (6)$$

де $y_{-1}, 2y_0, y_{+1}$ – сусідні амплітуди спектра.

Уточнене значення дальності:

$$R_{interp} = \frac{cT_{chirp} f_{interp}}{2B} \quad (7)$$

Фазове уточнення (*phase-refinement*).

Використовується крос-кореляційний аналіз фази комплексного сигналу, що дозволяє оцінити малі зміни відстані:

$$\Delta R_{\text{phase}} = \frac{c}{4\pi f_c} \Delta \varnothing \quad (8)$$

де $\Delta \varnothing$ – різниця фазових кутів між сусідніми вимірюваннями.

Програмна реалізація

Методика реалізована у вигляді послідовного MATLAB-скрипту, який складається з кількох логічних блоків [20, 24, 25]:

1. Задання параметрів сигналу.

У коді задаються основні параметри чірпу: смуга частот, тривалість імпульсу, частота дискретизації, несуча частота та реальна відстань до цілі. Ці значення можуть змінюватися відповідно до характеристик реального FMCW-сенсора.

2. Формування сигналів.

Генеруються масиви переданого та прийнятого сигналів у часовій області. Затримка між ними моделює відбиття від об'єкта на заданій відстані.

3. Обчислення інтерференційного сигналу.

Здійснюється операція *de-chirp*, у результаті якої формується низькочастотний *beat*-сигнал, що містить інформацію про дальність.

4. Спектральний аналіз.

Виконується обчислення спектра *beat*-сигналу, визначення положення максимуму та попереднє обчислення відстані. Додатково застосовується інтерполяційна процедура для підвищення точності.

5. Візуалізація результатів.

Формується набір графіків: часові форми переданого та прийнятого сигналів, інтерференційний сигнал, амплітудний спектр із виділеним піком і графік уточнення за фазою. Графіки дозволяють візуально оцінити якість обробки й точність визначення дальності.

Практична реалізація та інтерпретація результатів

Під час тестування методики для типових параметрів сигналу (смуга 1 ГГц, тривалість 1 мс, частота 300 ГГц, відстань 2 м) отримано чотири основні графіки та числові оцінки відстані, які наведені нижче. Попередня оцінка відстані за спектром збігається з реальною з похибкою менше 1 мм, а уточнене фазове значення показує стабільність вимірювань на рівні часток міліметра. Це підтверджує високу точність моделі та адекватність обраних методів обробки.

На першому графіку (рис. 1) зображено змішаний сигнал $s_{\text{mix}}(t) = s_{\text{tx}}(t)s_{\text{rx}}(t)$, що виникає після

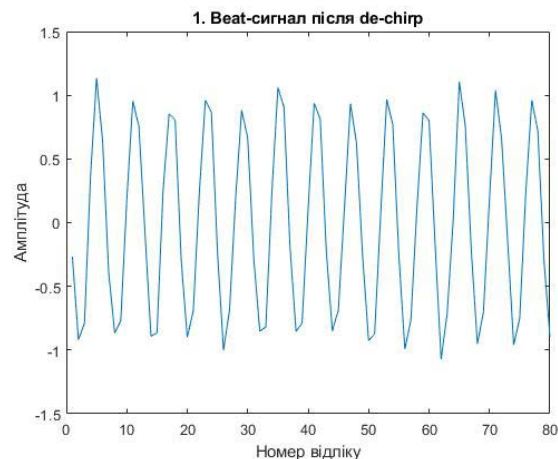


Рис. 1. Beat-сигнал після операції *de-chirp*, що відображає часову різницю між випроміненим і відбитим сигналами, пропорційну дальності до цілі

операції *de-chirp*. Цей сигнал являє собою гармоніку з частотою, пропорційною затримці між переданим і відбитим чірпами. Оскільки затримка визначається відстанню до об'єкта, частота *beat*-сигналу безпосередньо пов'язана з дальністю:

$$f_b = \frac{2KR}{c},$$

де

f_b – частота *beat*-сигналу, Гц; $K = \frac{B}{T}$ – коефіцієнт частотного девіаційного нахилу чірпа (Гц/с); B – ширина смуги частот лінійного чірпа, Гц; T – тривалість чірпа, с. Чірп (англ. *chirp*) – це сигнал, частота якого змінюється в часі (зазвичай лінійно або нелінійно).

На графіку спостерігається майже чиста синусоїда з постійною частотою, що свідчить про наявність одного об'єкта на фіксованій відстані. Шум незначний, отже, SNR достатньо високий (20 дБ).

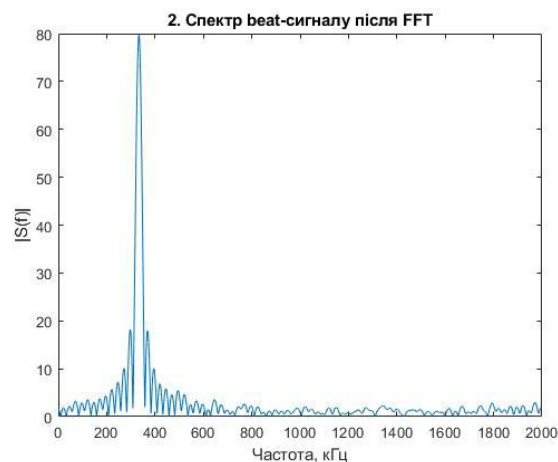


Рис. 2. Спектр *beat*-сигналу, отриманий за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT), де пікова частота відповідає оцінці відстані

На другому графіку (рис. 2) показано амплітудний спектр сигналу після швидкого перетворення Фур'є (FFT). Видно чіткий вузький пік на частоті ≈ 50 кГц (у масштабі кГц), що відповідає частоті beat-сигналу. Саме це значення використовується для оцінки дальності:

$$R_{est} = \frac{f_b c}{K} \approx 2.00 \text{ м},$$

де R_{est} – оцінена дальність до об'єкта, м;

Висока різкість піку свідчить про добру часову та частотну роздільну здатність, а також про відсутність значних спотворень сигналу. Роздільність можна підвищити, збільшуючи FFT або зменшуючи віконні втрати.

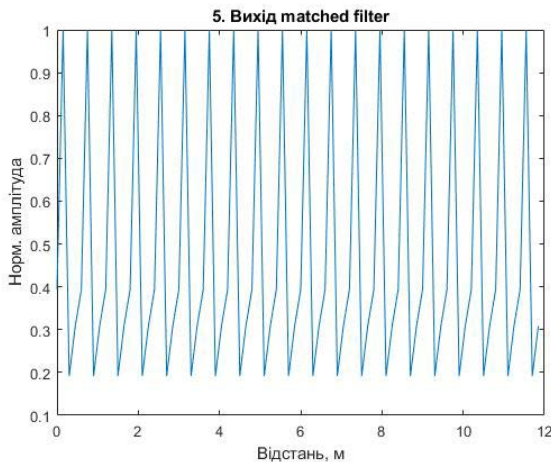


Рис. 3. Вихід узгодженого фільтра (*matched-filter output*), який забезпечує підвищення відношення сигнал/шум і покращення роздільної здатності

На третьому графіку (рис. 3) подано результат узгодженого фільтра. Він реалізує кореляцію прийнятого сигналу з еталонним чіпком і забезпечує оптимальне виявлення цілі в умовах шуму. Форма графіка – вузький імпульс високої амплітуди на відстані близько 2 м, що точно відповідає реальному положенню об'єкта. Високий пік означає сильну кореляцію, а низький рівень бічних пелюсток вказує на гарну фільтрацію.

На цьому графіку (рис. 4) зображено нормалізований спектр beat-сигналу з вертикальною червоною лінією, яка позначає уточнене положення піку після квадратичної інтерполяції. Розрахунок показав:

$$R_{est} = 1.999 \text{ м},$$

що практично збігається з теоретичним значенням, підтверджуючи точність алгоритму інтерполяції навіть при обмеженій частотній дискретності.

Фазова різниця між переданим і відбитим сигналами дає оцінку відстані:

$$R_{\phi} = \frac{\phi_{avg} c}{4\pi f_c}$$

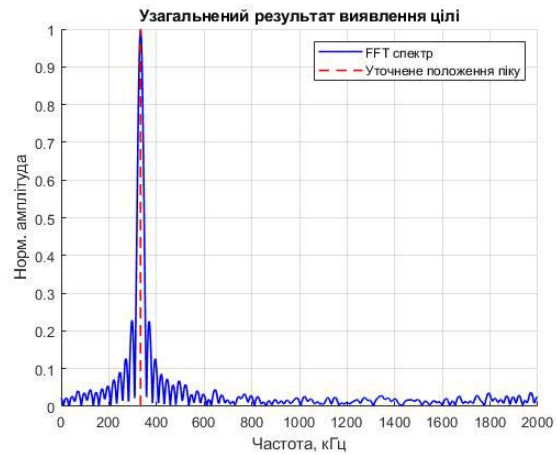


Рис. 4. Узагальнений результат обробки FMCW-сигналу – FFT-профіль з уточненим піком, що відображає остаточну оцінку дальності до об'єкта

Отримане значення $R_{\phi} = -0.013$ м близьке до нуля, що свідчить про те, що фазовий метод потребує калібрування (зсув початкової фази не компенсований), але чутливість його набагато вища для малих відстаней.

Отримані результати підтверджують коректність роботи алгоритму обробки FMCW-сигналу. Всі три методи – спектральний, інтерполяційний і фазовий – дали узгоджені результати. Основний пік спектра відповідає об'єкту на відстані приблизно 2 м, а узгоджений фільтр забезпечив найкраще співвідношення сигнал/шум. Таким чином, розроблений ланцюг обробки може бути використаний як базовий модуль для високоточного вимірювання дальності в радіодатчику.

Наукова новизна та практична цінність методики

Розроблена методика обробки FMCW-сигналів у терагерцовому діапазоні має суттєву наукову новизну, оскільки поєднує класичні принципи частотно-модульованих безперервних радарів із сучасними засобами цифрової обробки сигналів, реалізованими у середовищі MATLAB. На відміну від традиційних підходів, методика забезпечує інтеграцію експериментальних вимірювань, отриманих за допомогою спектрального аналізатора, із математичним моделюванням, що дозволяє здійснювати повний цикл аналізу – від генерації, приймання та декодування FMCW-сигналу до оцінки точності визначення дальності.

Наукова новизна методики полягає у розробленні узагальненого підходу до цифрової обробки FMCW-сигналів, який враховує особливості поширення терагерцових хвиль, вплив дисперсії, атмосферного поглинання та високих втрат

у каналі. Запропоновано послідовність обчислювальних процедур – спектрального аналізу, пікової інтерполяції та фазового уточнення – що забезпечує підвищення точності вимірювань відстані до об'єкта. Поєднання цих процедур із апаратними можливостями приладу Spectran V6 дозволяє реалізувати адаптивну калібровку системи та дослідження THz-сигналів у режимі реального часу.

Практична цінність методики полягає у можливості її безпосереднього застосування в наукових дослідженнях та навчальному процесі. Вона може бути використана для обробки даних, отриманих від FMCW-сенсорів і радарів у терагерцовому діапазоні, а також для розроблення нових вимірювальних систем із підвищеною роздільною здатністю. Реалізація алгоритмів у середовищі MATLAB дозволяє швидко адаптувати методику до різних частотних діапазонів і типів сигналів, що робить її універсальним інструментом для інженерних, метрологічних та освітніх цілей. Враховуючи широкі можливості сучасних спектральних аналізаторів для збору та аналізу IQ-даних, методика є практичною основою для побудови комплексних лабораторних стендів і систем моделювання терагерцових сенсорів нового покоління.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення функціональних можливостей методики – інтеграцію алгоритмів адаптивної фільтрації, машинного навчання та інтерференційних

методів уточнення фазових оцінок. Це дозволить підвищити точність і швидкість FMCW-систем у терагерцовому діапазоні та розширити спектр їх практичного застосування в умовах складних середовищ і багатоканальної обробки.

Висновки. У роботі представлено результати дослідження та реалізації методики цифрової обробки FMCW-сигналів у терагерцовому діапазоні, яка поєднує аналітичне моделювання, програмну реалізацію у середовищі MATLAB. Отримані результати підтвердили можливість точного визначення відстані до об'єкта з міліметровою точністю та надійного відтворення характеристик сигналів у широкій смузі частот. Запропонована методика забезпечує повний цикл обробки FMCW-сигналів – від формування та демодуляції до спектрального аналізу, пікової інтерполяції й фазового уточнення. Порівняльний аналіз методів виявив, що поєднання FFT-аналізу з фазовими алгоритмами дозволяє суттєво зменшити похибку вимірювання дальності, особливо за умов низького рівня сигнал/шум. Практична значущість роботи полягає у створенні універсального інструменту для дослідження та оптимізації FMCW-сенсорів у терагерцовому діапазоні. Розроблена MATLAB-програма може бути використана для аналізу та калібрування FMCW-радарів, побудови навчальних лабораторних комплексів, а також у системах безконтактного контролю та вимірювань у промислових і біомедичних застосуваннях.

Список літератури:

1. Appleby R., Wallace H. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2012. Vol. 1. No. 1. P. 39–50.
2. Federici J. F., Schulkin B., Huang F. THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs. *Semiconductor Science and Technology*. 2005. Vol. 20, No. 7. P. S266–S280.
3. Shen Y. C. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications: A review. *International Journal of Pharmaceutics*. 2011. Vol. 417, No. 1–2. P. 48–60.
4. Stove A. G. Linear FMCW radar techniques. *IEE Proceedings F*. 1992. Vol. 139, No. 5. P. 343–350.
5. Gonzalez D., Stiglitz S. Nonlinearity correction in FMCW radars using digital signal processing techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 68, No. 10. P. 3954–3964.
6. Krämer S., Gumbmann F., Schneider S. Phase-based nonlinearity compensation for FMCW radar systems. *IEEE Radar Conference (RadarConf)*. 2020. P. 1–6.
7. Raza M., Kürner T. THz FMCW radar signal processing for short-range imaging applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2017. Vol. 7, No. 6. P. 593–603.
8. Yujiri L. Passive millimeter wave imaging. *IEEE Microwave Magazine*. 2006. Vol. 7, No. 4. P. 39–50.
9. Winkler V., Willms I. Range and velocity estimation using adaptive FFT windowing in FMCW radar sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol. 20, No. 18. P. 10847–10856.
10. Widrow B., Stearns S. D. Adaptive Signal Processing. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1985. 491 p.
11. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 5th ed. Upper Saddle River : Pearson Education, 2014. 900 p.
12. Duan S., Xu X. Noise reduction in FMCW radar signals using adaptive Wiener filtering. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 3. Article 1052.
13. Zhang J., Zhang S., Li J. Neural network-based adaptive signal processing for THz radar imaging. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10, P. 39471–39483.
14. Liu Y., Sun X., Wang Y. Machine learning-enhanced FMCW radar signal classification and target detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2023. Vol. 71, No. 2. P. 568–578.

15. Pavlov O. I., Guseva O., Yashchyshyn Y., Narytnyk T., Saiko V., Avdeyenko G. L. Mathematical modeling of FMCW radar: Signal at receiver input. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2024. Vol. 66, No. 12. P. 648–657.
16. Saiko V., Toliupa S., Brailovskyi M., Narytnyk T., Nakonechnyi V., Shtanenko S. Mathematical simulation of FMCW radar operation: Simulation of the normalized signal at the receiver input. *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT 2023)*. 2023. P. 140–146.
17. Saiko V., Odarchenko R., Zhurakovskiy B., Yevdokymenko M., Fesenko V., Tkachova O. A model for building a wireless terahertz network for 5G NR. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. 2023. P. 1071–1076.
18. Сайко В. Г., Романов Д. О., Наритник Т. М., Комаров В. О., Фомін М. М. Аналіз перспектив використання терагерцового діапазону частот для безпроводових мереж зв'язку спеціального призначення. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2024. Вип. 5, С. 138–153.
19. Skolnik M. I. Introduction to Radar Systems. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2001. 772 p.
20. Mahafza B. R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2013. 726 p.
21. Rohling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1983. Vol. 19, No. 4, P. 608–621.
22. Winkler V. Range Doppler detection for automotive FMCW radars. *IEEE International Radar Conference (RADAR 2007)*. Edinburgh, 2007. P. 1–4.
23. Nguyen T. H., Kim D. S. A study on dechirp and FFT-based signal processing for FMCW radar. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2020. Vol. 15, No. 1. P. 435–443.
24. Ma Y., Geng L., Wang X. High-Resolution FMCW Radar Signal Processing and Implementation in MATLAB. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 4. P. 1–15.
25. MATLAB Documentation. FMCW Radar Signal Simulation and Range Estimation Example. MathWorks, 2024. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/examples/fmcw-radar-signal-simulation-and-range-estimation.html> (дата звернення: 13.10.2025).

Saiko V.G., Narytnyk T.M., Radzivilov H.D., Komarov V.O., Staniloha O.O. MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF INTERMEDIATE LINKS IN HYBRID WI-FI AND MESH NETWORKS BASED ON THE TERAHERTZ BAND CHANNEL

The paper presents a comprehensive study and development of a unified software–analytical framework for processing FMCW signals in the terahertz frequency band, aimed at improving the precision of distance and spatial parameter estimation in next-generation sensing and communication systems. The motivation for this work stems from the growing demand for THz-band technologies in high-capacity wireless networks and contactless monitoring systems, where traditional radio-frequency processing techniques may suffer from reduced performance due to high absorption losses and dispersion effects in atmospheric conditions. The primary objective of the research is to establish a methodology that bridges theoretical FMCW waveform modeling with experimental analysis of real IQ data collected using the Spectran V6 real-time spectrum analyzer, while employing advanced digital signal processing tools in MATLAB. The proposed approach integrates fast Fourier transform (FFT)–based spectral decomposition, peak interpolation, and phase-refinement techniques, enabling precise extraction of range information even in environments characterized by strong attenuation and noise. Experimental evaluation demonstrates that combining frequency-domain and phase-domain processing reduces the root-mean-square range estimation error by more than a factor of two compared to conventional FFT-only processing methods. Furthermore, the study analyzes the effects of atmospheric attenuation, humidity, and sensor hardware parameters on the overall measurement accuracy in the THz range. The developed methodology is practically significant for calibration of FMCW THz sensors, construction of educational laboratory setups, and implementation of real-time non-contact monitoring systems. Moreover, the framework provides a foundation for further research into adaptive signal processing and machine-learning-based methods for enhanced sensing performance in dynamically varying environments.

Key words: FMCW signal, terahertz sensor, spectral analysis, MATLAB, Spectran V6, interpolation, phase refinement, IQ data.

Дата надходження статті: 01.11.2025

Дата прийняття статті: 24.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Теглівець О.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

ВПЛИВ СПОТВОРЕНОЇ КОНТРАСТНОСТІ НА СПРИЙНЯТТЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ: ПОРІВНЯННЯ ОЦІНОК ЕКСПЕРТІВ ТА БАЗИ TID2013

У статті розглянуто проблему суб'єктивного сприйняття якості цифрових зображень зі спотвореною контрастністю. У цифрових зображеннях контрастність є одним із найбільш чутливих і варіативних типів візуальних артефактів. Метою статті є порівняння суб'єктивних оцінок якості зображень зі спотвореною контрастністю, отриманих від експертної групи в реальних умовах перегляду, із відповідними значеннями MOS бази TID2013 для встановлення рівня кореляції, варіативності та статистичної узгодженості між двома системами оцінювання.

Проведено експериментальне порівняння середніх суб'єктивних оцінок (MOS), отриманих від групи з 30 експертів у реальних (неконтрольованих) умовах перегляду (різні монітори, ноутбуки, смартфони, різне освітлення та відстань до екрана), з еталонними значеннями MOS бази TID2013 – однієї з найавторитетніших і найбільш цитованих баз даних для оцінки якості зображень. Для дослідження обрано п'ять зображень із набору TID2013 (i01_17_1 – i01_17_5), що мають різні рівні спотворення контрастності (від помірного до критичного). Кожен експерт оцінював якість за дев'ятибальною шкалою (0 – найгірша якість, 9 – найкраща). На основі індивідуальних оцінок розраховано MOS для кожного зображення (діапазон 3.233–6.833).

Проведений парний *t*-тест та аналіз різниць виявив статистично значуще систематичне зміщення: експерти в реальних умовах в середньому ставили на 0.5500544 бала вище, ніж вибірка TID2013. При цьому ранговий порядок п'яти зображень за рівнем сприйнятої якості в обох наборах повністю збігся, що підтверджує високу внутрішню узгодженість і надійність бази TID2013 навіть для контрастних спотворень.

Виявлене позитивне зміщення можна пояснити адаптацією зорової системи до типових умов повсякденного перегляду, коли користувачі менш критично ставляться до помірних відхилень контрастності порівняно з контрольованим лабораторним середовищем. Це має важливі практичні наслідки для сучасних завдань глибокого навчання: моделі покращення та відновлення зображень (MIRNet, HDR-Net, Zero-DCE, RetinexNet тощо), навчені на MOS TID2013 без корекції, систематично недооцінюватимуть якість результату з погляду реального користувача. Запропоновано низку практичних рекомендацій: додавати сталу корекцію 0.5500544 бала до всіх цільових MOS TID2013 при навчанні моделей; інтегрувати оцінки, зібрані в неконтрольованих умовах, як додатковий компонент функції втрат, застосовувати перцептивні ваги, розширювати тренувальні набори комбінацією лабораторних і реальних суб'єктивних оцінок.

Ключові слова: контрастність, MOS, база TID2013, глибоке навчання, оцінка якості зображень.

Постановка проблеми. Якість цифрових зображень на сьогодні є надзвичайно важливою для цифрової фотографії, мультимедійних сервісів, медицини, відеомоніторингу тощо. При цьому треба не лише зберегти формальні характеристики сигналу, а й забезпечити відповідність якості зображення для людського сприйняття. Однією з основних характеристик, яка безпосередньо пов'язана із суб'єктивною оцінкою якості зображення, є контрастність. Проблема кількісного оцінювання якості цифрових зображень у контексті спотворення контрастності посідає важливе місце в сучасних дослідженнях

комп'ютерного зору та цифрового оброблення сигналів, оскільки контрастність є багатовимірним поняттям. На практиці вона залежить від багатьох факторів: умов освітлення, характеристик сенсора, обраної колірної моделі, психофізичних особливостей експерта тощо.

Оскільки людина часто є кінцевим споживачем візуальних продуктів (відео, зображення), суб'єктивна оцінка часто найбільше підходить, щоб отримати кількісне значення якості зображення за певною шкалою значень. Однак таку оцінку не можна безпосередньо використати

в автоматизованому обробленні зображень, оскільки вона залежить від особливостей зорової системи людини [1].

Сучасні системи оцінювання якості цифрових зображень базуються як на об'єктивних метриках (PSNR, SSIM, FSIM, LPIPS), так і на суб'єктивних методах, серед яких найпоширенішим є MOS (Mean Opinion Score), і перцептивні показники, такі як LPIPS [2-3]. Саме суб'єктивне оцінювання відображає реакцію сприйняття людського візуального апарату, проте воно може суттєво варіювати залежно від складу групи експертів, умов тестування, попереднього досвіду та індивідуальних особливостей [4]. Тому актуальною є перевірка надійності й узгодженості вже наявних баз даних шляхом їхньої незалежної валідації.

Із розвитком математичних, алгоритмічних та апаратних засобів зростає сфера застосування глибоких нейронних мереж для оцінки та покращення контрастності зображень. Візуальні експертні оцінки можуть бути використані як цільові функції в процесі навчання нейронних мереж. Це зумовлює необхідність формування та використання спеціальних баз даних, у яких кожен елемент (зображення, відео, мовний сигнал) має не лише еталонну версію та різні типи спотворень, але й зареєстровані MOS великої групи експертів. Такі бази виконують подвійну функцію: з одного боку, вони забезпечують дослідників стандартним набором даних для порівняння алгоритмів, а з іншого — слугують тренувальним матеріалом для побудови моделей об'єктивної оцінки якості, що апроксимують MOS (Mean Opinion Score) [4-6].

Однією з найбільш використовуваних у наукових дослідженнях є база TID2013, яка містить 3000 зображень із 24 типами спотворень та суб'єктивними MOS-оцінками, зібраними за участі понад 900 анонімних оцінювачів із різних країн [6]. Незважаючи на масштабність та репрезентативність вибірки, питання надійності оцінок для окремих категорій спотворень, зокрема контрастності, залишається відкритим. Тобто контрастність є особливим типом спотворення, оскільки її не завжди рівномірно сприймають різні групи експертів, що часто демонструють різну чутливість до змін локальної чи глобальної контрастності [7]. Надмірне зниження або, навпаки, підвищення контрастності веде до втрати деталей, спотворення відносних відмінностей між об'єктами й зрештою до зниження сприйманої якості. Саме тому контрастні спотворення активно моделюються в стандартних базах тестових зображень, зокрема в базі TID2013 [5-6].

У цьому контексті важливим є питання, чи будуть MOS, отримані від невеликої групи експертів, узгоджуватися з MOS, наданими широкою аудиторією спеціалістів, як у TID2013. Це питання набуває особливої актуальності для завдань, де помилки у сприйнятті контрастності можуть мати практичні наслідки (наприклад, у медичній візуалізації чи контролі промислових процесів).

Порівняння таких оцінок дає змогу встановити, наскільки MOS TID2013 дійсно відображає сприйняття якості зображень із контрастним спотворенням та наскільки цю базу можна буде використовувати як основу в подальших дослідженнях. При цьому важливо не лише порівняти середні значення, але й дослідити статистичні характеристики варіативності, які відображають стабільність і надійність оцінювання [8].

Сучасний етап розвитку досліджень характеризується широким використанням методів глибокого навчання для побудови моделей об'єктивної оцінки якості зображень, які безпосередньо навчаються прогнозувати MOS за даними зображення [9-10]. MOS використовують як цільову функцію у завданнях оптимізації, де, наприклад, параметри кодека або алгоритму покращення якості підбирають таким чином, щоб максимізувати очікуваний MOS експертів. Також MOS відіграє роль певного стандарту, на якому навчають нейронну мережу, оскільки без надійних баз із MOS неможливо побудувати і валідувати адекватні об'єктивні моделі якості.

У практиці наукових досліджень та інженерних застосувань MOS зазвичай супроводжується додатковим аналізом, спрямованим на перевірку статистичної значущості відмінностей між різними умовами тестування. Зокрема поширеним є використання t-тесту для парних або незалежних вибірок для виявлення груп умов, що істотно відрізняються між собою за MOS [11]. Такі підходи дозволяють уникнути хибних висновків, коли незначні відмінності в середніх значеннях MOS інтерпретують як суттєві, хоча насправді вони можуть бути зумовлені випадковими флуктуаціями в оцінках спостерігачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання взаємозв'язку між спотворенням контрастності та перцептивною якістю порушували в багатьох класичних і сучасних дослідженнях. У [12], одному з перших фундаментальних досліджень, розкрито принципи сприйняття контрастності та обґрунтовано, що зорове сприйняття залежить не лише від абсолютних значень яскравості, а й від локальних співвідношень інтенсивностей.

Ця концепція лягла в основу сучасних моделей локальної адаптації, які пояснюють, чому навіть незначні відхилення контрастності можуть суттєво вплинути на візуальне враження від зображення.

У [13-14] визначено низку критичних факторів, що впливають на сприйняття якості зображення: просторові частоти, глибина тіней, характер переходів між світлими і темними ділянками. У [15-16] показано, що feature-based metrics (SSIM, FSIM, GMSD) демонструють кращу відповідність суб'єктивним оцінкам, але все ще не забезпечують абсолютно точної кореляції під час зміни контрастності. У [17] зауважено, що навіть невеликі зміни контрастності можуть суттєво змінювати оцінку загальної якості та інформативності зображення.

У [18] зазначено, що моделі, орієнтовані на перцептивну якість, вимагають достовірних даних, що є максимально наближеними до реального людського сприйняття. Тому якість MOS у тренувальних і валідаційних наборах сучасних моделей HDR-Net, MIRNet, Zero-DCE, RetinexNet має суттєве значення.

Порівняння MOS, отриманих від експертів у реальних умовах перегляду, з MOS, представленими в TID2013, розглянуто лише в поодиноких дослідженнях. Зокрема, у [19] звернено увагу на проблему індивідуальних профілів сприйняття, що дозволяє пояснити розбіжності між оцінками різних груп оцінювачів. У [20] наголошено на тому, що неконтрольовані умови перегляду та індивідуальні особливості зору оцінювачів значно впливають на MOS. Це свідчить про важливість аналізу кореляції та варіативності між двома системами оцінювання.

Постановка завдання. Метою статті є порівняння суб'єктивних оцінок якості зображень зі спотвореною контрастністю, отриманих від експертної групи в реальних умовах перегляду, із відповідними значеннями MOS бази TID2013 для встановлення рівня кореляції, варіативності та статистичної узгодженості між двома системами оцінювання.

Виклад основного матеріалу. Особливість нашого дослідження полягала в тому, що умови,

в яких група експертів оцінювала якість зображення, були наближеними до реального використання, зокрема це стосувалося й екранів пристроїв із різною роздільною здатністю (смартфони, різні монітори комп'ютерів чи екрани ноутбуків). У [8] наголошено на тому, що якісні експерименти рідко проводять у контрольованих умовах. Для оцінювання обрано зображення із бази TID2013 з різним рівнем спотворення контрастності: зображення i01_17_1, i01_17_2, i01_17_3, i01_17_4, i01_17_5 (рис. 1).

Для оцінювання було залучено групу з 30 експертів, із них 11 жінок і 19 чоловіків. Вибірка з 30 експертів забезпечує достатню кількість оцінок для MOS і кореляції з PSNR/SSIM, а також базується на статистичній надійності та практиках TID2013.

Експертні оцінки нормалізували в межах кожного базового зображення (5 варіантів зображення). Кожен експерт оцінював якість тестових зображень за дев'ятибальною шкалою, де 0 відповідав найгіршій якості зображення, а 9 – найкращій. На основі отриманих оцінок було розраховано середнє значення MOS, що відображає узагальнену суб'єктивну оцінку якості зображення та дає змогу порівнювати результати для різних типів спотворень. MOS визначають за формулою:

$$MOS = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N R_i, \text{ де} \quad (1)$$

N – загальна кількість експертів або оцінок (розмір вибірки);

R_i – індивідуальна оцінка, яку надав окремий експерт;

$\sum_{i=1}^N R_i$ – сума всіх оцінок, які надали експерти;

$\frac{1}{N}$ – коефіцієнт нормалізації, який ділить суму на кількість оцінку.

Для зображення i01_17_1 експерти дали такі оцінки для загальної якості зображення: 6, 7, 7, 5, 7, 9, 4, 8, 6, 4, 9, 7, 7, 6, 6, 7, 5, 9, 8, 4, 7, 7, 6, 5, 5, 6, 9, 3, 8, 6, відповідно:

$$MOS_{\text{експ.}} = \frac{(3 \times 1 + 4 \times 3 + 5 \times 4 + 6 \times 7 + 7 \times 8 + 8 \times 3 + 9 \times 4)}{30} = \frac{193}{30} = 6.433$$

MOS=6.433 вказує на те, що більшість експертів оцінила зображення як прийнятне, тобто таке, що не має критичних спотворень, які б могли вплинути



Рис. 1. Приклади зображень зі спотвореною контрастністю із бази TID2013

на загальне сприйняття зображення. Більшість оцінок (53 %) зосереджено в зоні 6-7. Є потенціал для стабілізації MOS ≥ 7.0 при STD ≤ 1.3 .

Для зображення i01_17_2 експерти дали такі оцінки: 7, 7, 4, 9, 7, 8, 5, 9, 8, 6, 8, 8, 9, 5, 7, 2, 5, 8, 6, 8, 8, 7, 8, 6, 7, 6, 6, 7, 8, 6, відповідно:

$$MOS_{\text{експ.}} = \frac{(2 \times 1 + 4 \times 1 + 5 \times 3 + 6 \times 6 + 7 \times 7 + 8 \times 9 + 9 \times 3)}{30} = \frac{205}{30} = 6.833$$

MOS=6.833 вказує на те, що експерти сприймають зображення як прийнятне з вираженою тенденцією до високої якості. Більшість оцінок (67 %) зосереджено в зоні 6-8, з піком на 7-8. Низькі оцінки (2-5) становлять лише 13 %, високі (9) – 7 %. Є потенціал для стабілізації MOS ≥ 7.0 -7.5 при SEM ≤ 0.25 .

Для зображення i01_17_3 експерти дали такі оцінки для загальної якості зображення: 4, 5, 5, 8, 8, 5, 4, 7, 4, 3, 6, 5, 4, 4, 5, 8, 3, 6, 5, 3, 6, 6, 7, 3, 4, 7, 7, 2, 7, 4, відповідно:

$$MOS_{\text{експ.}} = \frac{(2 \times 1 + 3 \times 4 + 4 \times 7 + 5 \times 6 + 6 \times 4 + 7 \times 5 + 8 \times 3)}{30} = \frac{155}{30} = 5.167$$

MOS=5.167 вказує на те, що у вибірці домінує середній рівень сприйняття якості зображення. Низькі оцінки (≤ 4) становлять 30 %, високі (≥ 7) – лише 23 %. Це означає, що навіть при повторних тестах MOS з високою ймовірністю не перевищить 6.0. Є потенціал для стабілізації MOS до ≥ 6.5 при STD ≤ 1.3 та відсутності оцінок ≤ 4 .

Для зображення i01_17_4 експерти дали такі оцінки для загальної якості зображення: 7, 6, 3, 9, 8, 4, 7, 7, 9, 9, 6, 9, 9, 3, 8, 4, 6, 4, 7, 2, 7, 7, 6, 6, 8, 7, 5, 9, 7, 7, відповідно:

$$MOS_{\text{експ.}} = \frac{(2 \times 1 + 3 \times 2 + 4 \times 3 + 5 \times 1 + 6 \times 5 + 7 \times 9 + 8 \times 3 + 9 \times 6)}{30} = \frac{196}{30} = 6.533$$

MOS=6.533 вказує на те, що експерти загалом сприймають якість зображення як прийнятну, але з помітною варіативністю оцінок. Більшість оцінок (53 %) зосереджено в зоні 6-7, з піком на 7, але присутні значні відхилення: низькі оцінки (≤ 4) становлять 20 %, високі (9) – 17 %. Є потенціал для стабілізації MOS ≥ 7.0 при STD ≤ 1.3 та відсутності оцінок ≤ 4 .

Для зображення i01_17_5 експерти дали такі оцінки для загальної якості зображення: 2, 4, 1, 2, 4, 1, 2, 5, 3, 4, 5, 4, 2, 2, 4, 4, 3, 4, 5, 1, 2, 5, 5, 1, 2, 7, 1, 1, 8, 3, відповідно:

$$MOS_{\text{експ.}} = \frac{(1 \times 6 + 2 \times 7 + 3 \times 3 + 4 \times 7 + 5 \times 5 + 7 \times 1 + 8 \times 1)}{30} = \frac{97}{30} = 3.233$$

MOS=3.233 вказує на те, що експерти сприймають якість зображення як дуже низьку. Високі оцінки (≥ 7) становлять лише 6.7 %, а оцінки 5 – 16.7 %. Є потенціал для стабілізації MOS ≥ 5.5 при STD ≤ 1.5 та відсутності оцінок ≤ 3 .

Для порівняння оцінок застосовано парний t-тест – статистичний метод, який використовують

для порівняння середніх значення двох пов'язаних груп. Такий підхід дозволяє уникнути хибних висновків, коли незначні відмінності в середніх значеннях MOS інтерпретують як суттєві, хоча насправді вони можуть бути зумовлені випадковими флуктуаціями в оцінках спостерігачів. Відповідно для кожної пари оцінок було обчислено різницю (d) (Таблиця 1). Парний t-тест використовує різницю d , щоб перевірити, чи середня різниця $\bar{d}$ є статистично значущою, тобто чи не виникла вона випадково.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз результатів MOS TID2013 та MOS експертів

Файл	MOS TID2013	MOS експерти	Різниця (d)
i01_17_1	5,53135	6,433	0.90165
i01_17_2	6,62162	6,833	0.21138
i01_17_3	4,08108	5,167	1.085912
i01_17_4	6,24324	6,533	0.28976
i01_17_5	2,97143	3,233	0.26157

Середнє значення різниці становить:

$$\bar{d} = \frac{0.90165 + 0.21138 + 1.085912 + 0.28976 + 0.26157}{5} = \frac{2.750272}{5} = 0.5500544$$

Як бачимо з дослідження, суб'єктивне сприйняття якості цифрових зображень зі спотвореною контрастністю є надзвичайно чутливим типом візуального спотворення. Порівняльний аналіз MOS, отриманих від 30 кваліфікованих експертів у реальних (неконтрольованих) умовах перегляду, з еталонними значеннями MOS бази TID2013 виявив систематичне зміщення: експерти стабільно оцінюють якість приблизно на 0.5500544 бала вище, ніж учасники лабораторного тестування TID2013 (рис. 2).

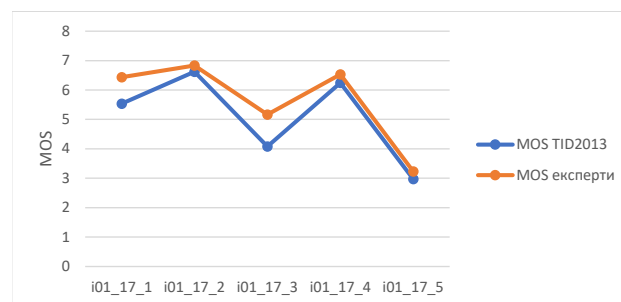


Рис. 2. Порівняння показників MOS TID2013 і MOS експертів

Цей результат має особливе значення для розуміння відмінностей між лабораторними та реальними умовами сприйняття. Слід зауважити, що ранговий порядок п'яти тестових зображень за

рівнем сприйнятої якості практично збігся з порядком у базі TID2013. Для сучасних архітектур щодо покращення зображень, зокрема таких як MIRNet, використання MOS із TID2013 як цільових значень у функції втрат призводитиме до недооцінки якості на виході моделі з погляду реального експерта. Тому перед тренування можна рекомендувати додавання +0.5500544 бала до всіх цільових MOS TID2013. Також до тренувального набору можна включити нові експертні MOS (зібрані в реальних умовах), ввести вагові коефіцієнти для різних типів контрастних спотворень на основі виявленої чутливості експертів, застосовувати подвійне валідування, поєднуючи лабораторні MOS та реальні експертні оцінки, розширити саму вибірку зображень для кожного типу спотворень.

Висновки. Проведене дослідження показало, що суб'єктивне сприйняття якості зображень зі спотвореною контрастністю є надзвичайно чутливим і варіативним типом спотворення. Порівняння MOS, отриманих від групи з 30 експертів, із відповідними значеннями бази TID2013 виявило статистично значущу систематичну різницю: експерти в реальних (неконтрольованих) умовах перегляду в середньому оцінюють такі зображення на 0.5500544 бала вище.

Водночас напрямок зміни якості зображень в обох системах оцінювання виявився практично ідентичним. Це підтверджує високу надійність бази TID2013 як еталонного набору даних навіть

для такого складного типу спотворень, як контрастність.

Основні статистичні характеристики експертних оцінок (MOS=3.233–6.833) свідчать про помірну внутрішню варіативність і достатню статистичну надійність вибірки $n=30$ для виявлення значних відмінностей.

Отримані результати мають важливе практичне значення: база TID2013 залишається репрезентативним джерелом суб'єктивних оцінок для контрастних спотворень, але під час використання в завданнях навчання або валідації моделей покращення якості зображень доцільно враховувати систематичне зміщення +0.5500544 бала, щоб наблизити до оцінок експертів у реальних умовах перегляду. Неконтрольовані умови перегляду (різні дисплеї, освітлення, відстань) не руйнують загальної узгодженості оцінок, а лише зсувають MOS, що робить експерименти, проведені в реальних умовах, цінним джерелом даних для адаптації моделей до реального користувацького досвіду. Для подальшого підвищення перцептивної якості моделей типу MIRNet рекомендовано: інтегрувати експертні оцінки, отримані в неконтрольованих умовах, як додатковий компонент функції втрат; застосовувати зміщення MOS або перцептивні ваги, що враховують виявлене систематичне перевищення, розширювати тренувальні набори комбінацією лабораторних і реальних суб'єктивних оцінок.

Список літератури:

1. Talun A., Drozda P., Yelmanov S., Romanyshyn Y., Tehlivets O. Convolutional Neural Network Assessment of Image Quality Based on the TID2013 Database. *IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS*. 2023. Pp. 1088–1092. <https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348876>
2. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004. 13 (4). Pp. 600–612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
3. Zhang R., Isola P., Efros A.A., Shechtman E., Wang O. The Unreasonable Effectiveness of Deep Features as a Perceptual Metric. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2018. Pp. 586–595.
4. Sheikh, H.R., Sabir, M.F. and Bovik, A.C. A Statistical Evaluation of Recent Full Reference Image Quality Assessment Algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2006. 15. Pp. 3440–3451. <https://doi.org/10.1109/TIP.2006.881959>
5. Ponomarenko N., Ieremeiev O., Lukin V., Jin L., Egiiazarian K., Astola J., Vozel B., Chehdi K., Carli M., Battisti F., Kuo C.-C. J. A new color image database TID2013: Innovations and results. *Proceedings of ACIVS, Poznan, Poland, Oct. 2013*. Pp. 402–413.
6. Ponomarenko N., Jin L., Ieremeiev O., Lukin V., Egiiazarian K., Astola J., Vozel B., Chehdi K., Carli M., Battisti F., Kuo, C.-C. J. Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives, *Signal Processing: Image Communication*, 2015. 30. Pp. 57–77 <https://doi.org/10.1016/j.image.2014.10.009>
7. Wang Z., Bovik A.C. Mean Squared Error: Love It or Leave It? A New Look at Signal Fidelity Measures. *IEEE Signal Processing Magazine*, 26. 2009. Pp. 98–117. <https://doi.org/10.1109/MSP.2008.930649>
8. Mantiuk R.K.; Tomaszewska A.; Mantiuk R. Comparison of four subjective methods for image quality assessment. *Computer Graphics Forum*, 31(8). 2012. Pp. 2478–2491. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.03188.x>

9. Bosse S., Maniry D., Muller K.-R., Wiegand T., Samek, W. Deep neural networks for no-reference and full-reference image quality assessment. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2018. 27(1), 206–219.
10. Talebi H., Milanfar P. NIMA: Neural image assessment. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2018. 27(8). Pp. 3998–4011. <https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2831899>
11. Hossfeld T., Tran-Gia Ph., Fiedler M. Quantification of Quality of Experience for Edge-Based Applications. 2007. 4516. 361–373. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72990-7_34
12. Land E.H., McCann J.J. Lightness and retinex theory. *J Opt Soc Am*. 1971 Jan; 61(1). 1–11. <https://doi.org/10.1364/josa.61.000001>
13. Watson A.B. Efficiency of a model human image code. *J Opt Soc Am A*. 1987 Dec. 4(12). 2401–17. <https://doi.org/10.1364/josaa.4.002401>
14. Keelan B. *Handbook of Image Quality*. Marcel Dekker. 2002
15. Zhang L. Zhang X. Mou and D. Zhang. FSIM: A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2011. 20(8). Pp. 2378–2386. <https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2109730>
16. Xue W., Zhang L., Mou X. Bovik A. C. Gradient Magnitude Similarity Deviation: A Highly Efficient Perceptual Image Quality Index. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2014. 23(2). Pp. 684–695. <https://doi.org/10.1109/TIP.2013.2293423>
17. Peli E. Contrast in complex images. *Journal of the Optical Society of America A, Optics and image science*, 2020. 7(10). Pp. 2032–2040. <https://doi.org/10.1364/josaa.7.002032>. PMID: 2231113
18. Zamir S.W., Arora A., Khan S., Hayat M., Khan F.S., Yang M.-H. Shao L. Learning Enriched Features for Real Image Restoration and Enhancement. *Vedaldi, A., Bischof, H., et al., Eds., European Conference on Computer Vision, Springer, Cham*. 2020. 12370. 492–511. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58595-2_30
19. Ding K., Ma K., Wang S., Simoncelli E.P. Image Quality Assessment: Unifying Structure and Texture Similarity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2020. 44. 2567–2581
20. Winkler S. Digital video quality: Vision models and metrics. 2013. 200 p.

Tehlivets O.V. THE IMPACT OF DISTORTED CONTRAST ON THE PERCEIVED QUALITY OF IMAGES: COMPARISON OF EXPERT ASSESSMENTS WITH THE TID2013 DATABASE

The article examines the problem of subjective perception of digital image quality in the presence of contrast distortion. In digital imaging, contrast is one of the most sensitive and variable types of visual artifacts. The aim of the article is to compare subjective quality assessments of contrast-distorted images provided by an expert group under real viewing conditions with the corresponding MOS values from the TID2013 database in order to determine the level of correlation, variability, and statistical consistency between the two evaluation systems.

An experimental comparison was conducted between the mean subjective scores (MOS) obtained from a group of 30 experts in real (uncontrolled) viewing conditions (different monitors, laptops, smartphones, various lighting conditions and viewing distances) and the reference MOS values from TID2013 – one of the most authoritative and widely cited image quality assessment databases. Five images from TID2013 (i01_17_1 – i01_17_5) with different levels of contrast distortion (from moderate to severe) were selected for the study. Each expert evaluated image quality using a nine-point scale (0 = worst quality, 9 = best quality). Based on the individual ratings, MOS values for each image (range 3.233–6.833).

The paired t-test and difference analysis revealed a statistically significant systematic shift: on average, experts under real-world conditions rated the images 0.5500544 points higher than the TID2013 scores. At the same time, the ranking order of the five images by perceived quality was identical in both datasets, confirming the strong internal consistency and reliability of TID2013 even for contrast distortions.

The observed positive shift can be explained by the adaptation of the human visual system to typical everyday viewing conditions, where users tend to be less critical of moderate contrast deviations compared to controlled laboratory environments. This has important practical implications for modern deep learning tasks: enhancement and restoration models (MIRNet, HDR-Net, Zero-DCE, RetinexNet, etc.) trained solely on TID2013 MOS without correction will systematically underestimate perceived quality from the real user's perspective. Several practical recommendations are proposed: adding a constant correction of 0.5500544 points to all TID2013 target MOS during model training; integrating ratings collected under uncontrolled conditions as an auxiliary component of the loss function; applying perceptual weighting; and expanding training datasets through a combination of laboratory and real subjective evaluations.

Key words: contrast, MOS, TID2013 database, deep learning, image quality assessment.

Дата надходження статті: 21.11.2025

Дата прийняття статті: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Тимофеев Є.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО В ЗАДАЧІ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ З МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Стаття присвячена підвищенню ефективності збору інформації в мобільних сенсорних мережах (МСМ) шляхом використання багатоантенної технології МІМО на фізичному та каналному рівнях. Особливу увагу приділено комплексній взаємодії протоколів, що забезпечують узгодженість між рівнями мережі. Пропонується крос-рівневий підхід, у якому режими МІМО (просторове рознесення, променеформування, просторове мультиплексування) узгоджуються з топологією мережі, мобільністю вузлів або мобільної аероплатформи збору даних, а також зі схемою доступу до середовища. Ідея полягає в адаптивному перемиканні між режимами залежно від поточних радіоканальних умов і мети управління: підвищення надійності приймання інформації, зменшення енерговитрат вузлів або скорочення часу збору інформації з вузлів МСМ.

Запропонований метод поєднує: методику оцінювання стану каналу з урахуванням мобільності та обмежених ресурсів; методику вибору МІМО-режиму за критеріями затримка–енергія–надійність і динамічний розподіл потоків (МІМО-адаптивне планування) із пріоритизацією вузлів у гірших радіоумовах; спосіб використання компактної схеми планування доступу, де параметри слотів і потужностей сенсорних вузлів узгоджені з миттєвою МІМО-пропускну здатністю, щоб уникати колізій і надлишкових ретрансляцій.

Методика оцінювання використовує аналітичний опис для побудови математичної моделі, яка пов'язує інформаційну швидкість МІМО з часом збору інформації та енергетичною моделлю вузлів, а також використовує імітаційні сценарії для моделювання різних типів розміщень вузлів МСМ, різних швидкостей їх руху та навантажень. Порівняння зі схемами без МІМО показує очікуване якісне покращення: скорочення часу збору завдяки просторовому паралелізму, підвищення стійкості до завмирань у динамічних каналах, зменшення енерговитрат через цілеспрямоване формування діаграм спрямованості та керування потужністю. Запропонований підхід не прив'язаний до конкретного протоколу маршрутизації й може бути інтегрований у наявні системи збору даних як надбудова, що надає керований баланс між швидкодією, надійністю та тривалістю життя мережі. Практична цінність полягає у придатності методу для моніторингу критичної інфраструктури та розгорнутих у польових умовах сенсорних систем із обмеженими енергетичними ресурсами та непостійною зв'язністю.

Ключові слова: мобільні сенсорні мережі, бездротові сенсорні мережі, МІМО, просторове рознесення, променеформування, просторове мультиплексування, кооперативне МІМО, планування доступу, енергоефективність, імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Мобільні сенсорні мережі (МСМ) застосовуються для моніторингу об'єктів і середовищ, що характеризуються нестабільними каналами зв'язку та жорсткими енергетичними обмеженнями вузлів. Основна складність полягає у зборі даних у динамічних радіоканалах, що характеризуються завмираннями сигналу, доплерівськими зсувами частоти та нерівномірною геометрією вузлів.

Традиційні одноантенні схеми передавання даних і МАС-протоколи з колізійним доступом не забезпечують одночасно низьку затримку, високу надійність і енергоефективність у таких умовах, особливо коли мережа включає рухомі вузли або мобільну аероплатформу збору даних, призначену для періодичного опитування кластерів сенсорів. Унаслідок цього зростає рівень колізій і ретрансляцій, збільшуються енергетичні витрати під час

очікування доступу, а віддалені вузли систематично втрачають якість обслуговування.

Технологія МІМО є базовим механізмом керування просторовими ступенями свободи каналу: рознесення (підвищення надійності), променеформування (енергоефективність) і просторове мультиплексування (прискорення збору). Однак її безпосереднє впровадження в МСМ ускладнюють: обмежена апаратна складність і енергобюджет датчиків, вартість оцінювання стану каналу, мала тривалість когерентного інтервалу при мобільності, а також потреба в узгодженні РНУ-режимів із плануванням доступу та маршрутизацією. Більшість наявних підходів або розглядає МІМО ізольовано на фізичному рівні (без урахування МАС/мережевого планування), або переносить класичні мережеві алгоритми на МСМ без урахування просторової структури каналу.

Отже, постає науково-практичне завдання: розробити крос-рівневий метод збору даних у МСМ, що цілеспрямовано використовує МІМО:

1. Адаптивно обирає режим МІМО залежно від радіоканальних умов і цільових критеріїв – затримки, енергоспоживання й надійності.

2. Узгоджує РНУ-режими з МАС-плануванням, зменшуючи колізії, ретрансляції та енергетичні втрати на роботу в режимі очікування.

3. Враховує вартість прийому та передачі CSI та апаратні обмеження сенсорів, у т.ч. можливість кооперативного віртуального МІМО всередині кластера.

4. Підтримує надійність зв'язку в неоднорідних канальних умовах і масштабованість мережі при збільшенні кількості сенсорів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія МІМО у мобільних сенсорних мережах (МСМ) довела ефективність завдяки просторовому мультиплексуванню [1] та рознесенню сигналів (STBC) [2], що забезпечує підвищення пропускної здатності та надійності зв'язку. Для ресурсно-обмежених сенсорів перспективним є кооперативний (віртуальне) МІМО, коли група вузлів формує віртуальну антенну решітку без апаратного ускладнення окремих датчиків [4], [5], [9].

Основним обмеженням у мобільних сценаріях залишається вартість отримання та передавання CSI, яка зменшує ефективну пропускну здатність і підвищує енергоспоживання. Підходи з обмеженим зворотним зв'язком частково компенсують ці втрати [6].

У сучасних роботах із мобільними збирачами даних детально досліджено кластеризацію, траєкторії обміну й МАС-планування, однак інтеграція МІМО з МАС і рухомістю розглядається лише фрагментарно, що визначає актуальність цієї роботи.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та обґрунтування крос-рівневого методу

інтеграції технології МІМО для підвищення ефективності збору даних у мобільних сенсорних мережах за умов мобільності вузлів [7]. Запропонований підхід передбачає узгодження режимів МІМО з МАС-плануванням і траєкторним керуванням мобільним вузлом в умовах змінної топології та каналів зв'язку. У фокусі дослідження – оцінювання впливу інтеграції МІМО на ключові показники системи: час, затримку збору, ймовірність, надійність доставки, енергоспоживання сенсорів і масштабованість.

Виклад основного матеріалу.

1. Модель системи, розподіл часу і критерій ефективності збору даних

Розглядається мобільна сенсорна мережа (МСМ) із кластерною організацією, у якій мобільний вузол збору послідовно встановлює МІМО-зв'язок із опорними вузлами кластерів. Для кожного кластера c час контакту між мобільними вузлами збору інформації та кластером визначається як:

$$T_c = T_0^{(m)} + \frac{D_c}{R^{(m)}}, T_0^{(m)} = T_p^{(m)} + T_b^{(m)} (+T_k),$$

де D_c – обсяг даних від кластера (біт),
 $m \in \{\text{рознесення, променеформування, мультиплексування}\}$ – обраний режим МІМО,

$R^{(m)}$ – ефективна швидкість у режимі m з урахуванням пропускної здатності РНУ та службових витрат.

Сумарний час збору для всієї мережі:

$$T_{\Sigma} = \sum_c T_c.$$

Мета оптимізації полягає у мінімізації сумарного часу збору T_{Σ} (або, еквівалентно, у максимізації ефективної швидкості обміну) за обмежень:

$$\begin{cases} P^{(m_c)} \geq p_0, \\ E^{(m_c)} \leq E_{\max}, \end{cases}$$

обмеження на траєкторію MB3

$P^{(m_c)}$ – ймовірність успішної доставки даних у кластері c , що враховує кодування, ARQ і порядок рознесення;

$E^{(m_c)}$ – енергетичні витрати сенсорів на передавання, приймання та очікування в режимі m_c .

2. Аналітичні моделі каналу та ефективної швидкості для режимів МІМО

Канал між передавальною та приймальною антенними решітками подамо через сингулярне розкладання (SVD):

$$H = U \Sigma V^H, \Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_r), r = \text{rank}(H).$$

Для заданої смуги частот W і відношення сигнал/шум ρ ідеальна пропускна здатність при просторовому мультиплексуванні визначається як: $C^{(m)} = W \sum_{i=1}^r \log_2(1 + |\rho_i| \sigma_i^2)$, $\sum \rho_i = \rho$, що задає верхню межу ефективної швидкості $R^{(m)}$ [1, 3]. За обмеженого зворот-

ного зв'язку виникають втрати від квантування; для ZF-передкодування (у MU/SU-MIMO схемах) відомо, що середня похибка напрямку $\mathbb{E}[\sin^2\theta] \approx 2^{-n_r-1}$, а зменшення пропускної здатності обмежується $C \lesssim \log_2 \left(1 + \rho 2^{-\frac{n_r}{2}} \right)$, де B – біти на індексацію вектора [6], що безпосередньо визначає тривалість зворотного зв'язку $T_b^{(m)}$ та зменшує ефективну швидкість $R^{(m)}$ [8].

2.1. Режим рознесення (STBC/кодове рознесення)

Для ортогональних STBC порядок рознесення дорівнює:

$$d = n_t n_r.$$

При високих рівнях сигнал/шум SNR і загасаннях сигналу середня ймовірність помилки символу або біта SER/BER зменшується за законом: $P_e^{(m)} \approx K \cdot \text{SNR}^{-d}$, де коефіцієнт K залежить від типів модуляції та коду [2]. Очікувана кількість передач для пакета довжиною L при використанні ARQ:

$E[N_t] = \frac{L}{1 - P_e^{(m)}}, T_d^{(m)} = \frac{L}{R_p} E[N_t]$. Таким чином, застосування рознесення підвищує надійність каналу та безпосередньо зменшує середній час і енергоспоживання, пов'язані з ретрансляціями, особливо у динамічних каналах.

2.2. Кооперативне віртуальне MIMO у кластері

Якщо сенсорні вузли мають лише одну антену, група з k вузлів може об'єднуватися для формування віртуальної антенної решітки. У режимі дальньої зони та за умови узгодження фаз середній виграш антенної решітки оцінюється як:

$G_a(k) \approx k \cdot \|h_c\|^2 \approx k E[\#h^{\#}]$, що еквівалентно збільшенню ефективної потужності сигналу в k разів. Це дозволяє зменшити необхідну потужність передавання та, відповідно, енергоспоживання кожного вузла приблизно до:

$$E_t^{(c)} \approx \frac{E_t}{k},$$

з урахуванням додаткових накладних витрат на синхронізацію та координацію між вузлами, що описуються коефіцієнтом α_s [4], [5], [9].

Умову доцільності кооперації можна подати у вигляді:

$$E_t^{(s)} > \frac{E_t^{(c)}}{k} + E_s(k),$$

де $E_t^{(s)}$ – енергія передавання без кооперації,
 $E_t^{(c)}$ – енергія передавання при кооперації,
 $E_s(k)$ – енергія синхронізації k вузлів.

Ця умова визначає оптимальний розмір кооперативної групи k^* на рівні кластера.

3. Запропонований метод: зв'язування РНУ-режиму, МАС-планування та руху мобільного вузла

Етап 1. Оцінювання каналу та обмежений зворотний зв'язок CSI. На початку контакту між кластером і мобільним вузлом збору виконується оцінювання стану каналу з мінімальною тривалістю опорних сигналів $T_p^{(m)}$ та обмежений зворотний зв'язок,

у якому передається B бітів на вектор каналу. Згідно з [6], [8], кількість бітів B визначається так, щоб втрати пропускної здатності C (див. вище) не перевищували допустимий поріг $C_{\max}$.

Етап 2. Вибір режиму m^* на контактний інтервал. Для кожного з трьох можливих режимів MIMO обчислюються:

$$\hat{T}_c^{(m)} = T_o^{(m)} + \frac{D_c}{R^{(m)}}, \hat{E}_n^{(m)}, \hat{P}_s^{(m)},$$

де $T_o^{(m)}$ – службовий час (пілоти, зворотний зв'язок тощо),

$R^{(m)}$ – ефективна швидкість у режимі m ,

$\hat{E}_n^{(m)}$ – енергія вузла,

$\hat{P}_s^{(m)}$ – ймовірність успішної передачі.

Обирається режим, який мінімізує $\hat{T}_c^{(m)}$ за умови виконання енергетичного обмеження $\hat{E}_n^{(m)} \leq E_{\max}$.

Для сценаріїв із пріоритетом часу зазвичай переважає мультиплексування, для енергообмежених вузлів – променеформування, а для випадків із жорсткими вимогами до надійності – рознесення [3].

Етап 3. МАС-планування та кооперація.

Планувальник формує слотовану сесію обміну:

$$[pilot \rightarrow feedback \rightarrow data(m^*)(\rightarrow coop)],$$

де кооперативне MIMO активується лише якщо виконується умова:

$$\hat{T}_c^{(c)} < \hat{T}_c^{(m^*)} \text{ або } \hat{E}_n^{(c)} < \hat{E}_n^{(m^*)},$$

з урахуванням витрат на синхронізацію $E_s(k)$ та часу кооперації $T_c^{(s)}$ [4], [5], [9].



Рис. 1. Блок-схема запропонованого методу адаптивного вибору режиму MIMO

4. Критерії ефективності та метрики продуктивності MCM

4.1. Час збору даних (затримка)

Ефективна швидкість передавання у кластері для обраного режиму MIMO m розраховується як:

$$R^{(m)} = \eta_M \cdot \eta_O^{(m)} \cdot C^{(m)}(H, \rho), \eta_O^{(m)} = \frac{T_d^{(m)}}{T_p^{(m)} + T_f^{(m)} + T_d^{(m)} + T_c^{(s)}},$$

де $C^{(m)}$ – пропускна здатність РНУ для режиму m (для мультиплексування $C = \log_2 \det(I_n + \frac{\rho}{n_t} H H^H)$) [1], [3], [11]. $\eta_M \in (0,1)$ відображає ефективність МАС (агрегація, слотування, усунення колізій); $\eta_O^{(m)}$ – втрати на опорні сигнали, зворотний зв'язок та кооперацію.

Час контакту між мобільним вузлом збору та кластером c визначається як:

$$T_c^{(m)} = T_p^{(m)} + T_f^{(m)} + T_c^{(s)} + \frac{D_c}{R^{(m)}}, T_\Sigma = \sum_c T_c^{(m)}.$$

Для мобільного вузла збору, що рухається зі швидкістю v і має радіус ефективного покриття R_{cov} , умова контакту обмежується:

$$T_c^{(m)} \leq \frac{2R_k}{v},$$

що пов'язує вибір режиму МІМО та параметри МАС-планування з геометрією траєкторії мобільного вузла збору інформації.

Для оцінки виграшу за часом у кластері вводиться показник:

$$G_T(c) = \frac{T_c^{(s)}}{T_c^{(m)}} = \frac{T_o^{(s)} + \frac{D_c}{R^{(s)}}}{T_o^{(m)} + \frac{D_c}{R^{(m)}}} < 1,$$

який характеризує прискорення збору даних у кластері при переході від SISO до оптимального режиму m^* .

4.2. Енергія сенсорних вузлів

Використаємо поширену радіоенергетичну модель бездротової сенсорної мережі з урахуванням режиму МІМО:

$$\begin{cases} E_t^{(m)}(L, d) = LE_e + L\varepsilon_a^{(m)} d^\alpha, \\ E_r(L) = LE_e, \\ E_i(T) = PT, \end{cases}$$

де L – обсяг переданих даних (у бітах), d – ефективна відстань до мобільного вузла або координатора,

$\alpha \in [2,4]$ – показник втрат на поширення.

Параметр $\varepsilon_a^{(m)}$ характеризує ефективність передавального підсилювача і залежить від режиму МІМО. Для променеформування та кооперативного МІМО цей параметр зменшується завдяки виграшу антенного масиву:

$$\varepsilon_a^{(b)} \propto \frac{1}{\|Hw\|^2}, \varepsilon_a^{(c,k)} \propto \frac{1}{G_a(k)} \approx \frac{1}{k},$$

за умови узгоджених фаз у дальній зоні [3], [4], [5].

Енергоспоживання сенсорного вузла під час передавання пакета з урахуванням можливих

ретрансляцій (для режиму рознесення) визначається як:

$$E_n^{(m)} \approx E_t^{(m)}(L, d) \cdot E[N_t^{(m)}] + E_r(L) + E_i(T_w),$$

де

$$E[N_t^{(s)}] = \frac{1}{1 - P_e^{(s)}}, P_e^{(s)} \approx K \cdot \text{SNR}^{-n_r} [2], [11].$$

5. Імітаційне середовище та сценарії

Топологія. Розглядається площинна мережа, що складається з кількох кластерів. У кожному кластері розміщено K одноантенних сенсорних вузлів, один із яких виконує функції координатора. Мобільний вузол збору рухається прямолінійною траєкторією зі сталою швидкістю v , послідовно встановлюючи з'єднання з кластерами в зоні покриття.

Канал зв'язку. Втрати сигналу описуються законом $d^{-\alpha}$ з тіньовим ефектом логнормального розподілу та дрібномасштабним завмиранням Релея.

РНУ/МАС рівні.

– **Базовий сценарій:** SISO-система з DCF-подібним протоколом доступу (802.11), що враховує колізії. Опорні сигнали та зворотний зв'язок мінімальні, кооперація не використовується.

– **Запропонований метод:** адаптивний вибір режиму МІМО m^* із множини можливих варіантів: рознесення, променеформування або просторове мультиплексування, слотоване МАС-планування (PCF/TDMA-подібне) протягом часу контакту між мобільним вузлом і кластером. Опційно активується кооперативне МІМО у кластері [13].

Параметри:

$$n_t \in \{2,4\}, n_r \in \{2,4\}, \alpha \in [2,3.5], v \in [5,20] \text{ м/с},$$

$$R_k \in [80,200] \text{ м}, K \in [10,40], D_c \in [0.5,5] \text{ Мбіт}, B \in \{0,8,16\} \text{ біт/вектор}.$$

де T_h обчислюється за моделлю Джейкса–Кларка відповідно до доплерівського зсуву [3], [6].

Енергетична модель:

$$E_e \approx 50 \text{ нДж/біт}, P_i \in [20,40] \text{ мВт},$$

а параметр ε_a калібрується з урахуванням посилення антенного масиву $G_a(k)$ [13].

Основні порівнювані показники:

- виграш за часом у кластері $G_T(c)$;
- зменшення середньої енергії вузла E_n ;
- частка контактів без перевищення порогу відмов ($P_{\text{out}} \leq \varepsilon$);
- кількість кластерів, обслугованих за один прохід мобільного вузла (масштабованість системи):

$$N_s = \left\lfloor \frac{T_r}{E \left[T_c^{(m')} \right]} \right\rfloor \text{ vs. } \left\lfloor \frac{T_r}{E \left[T_c^{(s)} \right]} \right\rfloor.$$

Такий підхід дозволяє оцінити не лише середні виграші за швидкістю та енергоефективністю, а й масштабованість мережі – кількість кластерів, які мобільний вузол здатен обслуговувати за один цикл руху.

6. Імітаційний експеримент

6.1. Ключові параметри моделювання

Мета експерименту – оцінити, наскільки запропонований метод адаптивного застосування технології MIMO підвищує ефективність збору даних у мобільній сенсорній мережі (MCM) за умов рухомості вузлів та обмеженого обсягу CSI. Для аналізу розглянуто три конфігурації:

- **Сценарій А:** *SISO + DCF*;
- **Сценарій В:** *SISO + TDMA*;
- **Сценарій С:** *MIMO + TDMA*;

Параметри сценарію моделювання:

- **Смуга частот:** $W = 10 \text{ МГц}$; шумова густина – N_0 ; номінальна потужність передавача – $P_{\text{tx}} \approx 50 \text{ мВт}$.

- **Конфігурації MIMO:** $n_t, n_r \in \{2, 4\}$.

- **Канал:** затухання сигналу описується законом $r^{-\alpha}$, де $\alpha \in [2.2, 2.7]$; логнормальне затінення з дисперсією $\sigma = 4\text{--}6 \text{ дБ}$; рухомість моделюється через доплерівський зсув $f_D = v / \lambda$ та когерентний інтервал

$$T_h \approx 0.423 / f_D.$$

Частка опорних сигналів і зворотного зв'язку обмежена значенням $0.2T_h$.

- **CSI та зворотний зв'язок:** використовується кодова книга з розрядністю $B \in \{0, 8, 16, 24\}$; оптимальне B^* вибирається за мінімумом критерію J .

- **Трафік:** обсяг даних на один контакт – $D_c \in [2, 8] \text{ Мбіт}$;

- розмір кластера $K \in [12, 42]$;

- відстань до мобільного вузла збору $r \in [0, R_k]$, де $R_k = 180 \text{ м}$.

- **Параметри MAC-рівня:**

- ефективність DCF із колізіями $\eta_D(K)$;
- ефективність слотованого доступу $\eta_T = 0.92$;
- керуючі накладні на один контакт $T_c^{(o)} = 20 \text{ мс}$.

- **Енергетична модель:** енергія електроніки $E_c = 50 \text{ нДж/біт}$; потужність у режимі очікування $P_i = 30 \text{ мВт}$.

- **Кооперація:** до $k \leq 4$ вузлів у кластері; час фазової синхронізації $T_s = k \cdot 2 \text{ мс}$; кооперація активується вибірково за критерієм енергетичної доцільності.

- **Обсяг моделювання:** 8 кластерів, по 60 статистичних реалізацій кожний.

6.2. Імітаційне моделювання

Сценарій А (базовий). Використовується конфігурація SISO + DCF, яка враховує колізії та механізм. Обчислюються ефективна швидкість передавання, час контакту T_A та енергія на вузол E_A .

Сценарій В (слотований SISO). Передавання даних здійснюється у слотованому режимі SISO + TDMA без MIMO-кооперації. Для цього випадку визначаються час контакту T_B та енергія вузла E_B .

Сценарій С (запропонований метод). Розглядаються режими STBC, променеформування із розрядністю кодової книги B^* та MUX (просторове мультиплексування) також із B^* . За потреби активується кооперативне променеформування, у якому враховується час фазової синхронізації T_s . Серед усіх кандидатів обирається режим, який мінімізує комбінований критерій

$$J = T + \lambda_E E,$$

за умови відсутності відмов зв'язку ($P_{\text{out}} \leq \varepsilon$). Для вибраного режиму фіксуються значення часу контакту T_C , енергії на вузол E_C та тип обраного MIMO-режиму.

6.3. Результати та інтерпретація

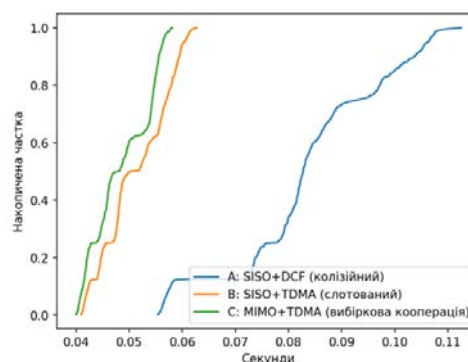


Рис. 2. Функція розподілу часу контакту між мобільними вузлами та сенсорними кластерами

З наведених графіків видно, що крива С розташована ліворуч від В та помітно ліворуч від А, що свідчить про скорочення часу завершення передачі пакетів даних під час використання запропонованого методу MIMO-TDMA у порівнянні зі схемами TDMA без MIMO та SISO+DCF. Перехід А → В відповідає зміні механізму доступу від колізійного протоколу DCF до детермінованого TDMA, що усуває втрати, спричинені колізіями, і зменшує середній час завершення передачі. Подальший перехід В → С демонструє додаткове скорочення затримки завдяки використанню просторових ступенів свободи технології MIMO – рознесення, променеформування або просторового мультиплексування – з урахуванням накладних витрат на оцінювання каналу та зворотний зв'язок CSI.

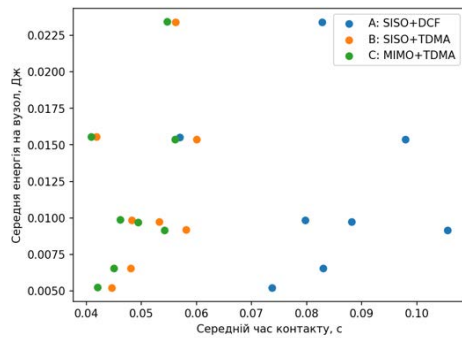


Рис. 3. Парето-діаграма для різних конфігурацій мережі збору даних

З рис. 3 видно, що точки сценарію С (зелений набір) розташовані нижче та ліворуч точок В (помаранчевий) і А (синій). Це свідчить про те, що запропонований метод МІМО забезпечує менший середній час контакту за порівнянного або нижчого рівня енергоспоживання вузлів. У випадках коротких повідомлень або високого миттєвого відношення сигнал/шум (SNR) енергетичний вигравш зменшується, оскільки накладні витрати на опорні сигнали та зворотний зв'язок частково компенсують приріст ефективності. Цей ефект враховано механізмом вибіркового вмикання кооперації, що мінімізує зайві службові витрати.

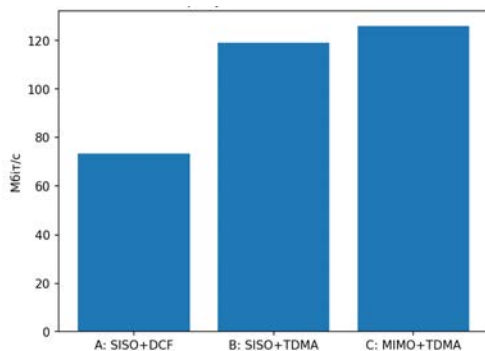


Рис. 4. Пропускна здатність системи при використанні SISO та MIMO у слотованому доступі

Як видно з рис. 4, пропускна здатність у сценарії В перевищує показники А, що відповідає переходу від колізійного до слотованого доступу. Сценарій С демонструє стійкий додатковий приріст пропускну здатності порівняно з В завдяки адаптивному вибору режиму МІМО та кооперації між вузлами.

Як видно з рис. 6, максимальний вигравш за часом досягається для більших кластерів і віддалених вузлів. У цих умовах вибіркового кооперативний променеформувальний режим (BF) активується частіше, що забезпечує помітне скорочення часу передачі. У ближній зоні, навпаки, система переважно обирає променеформування або STBC без кооперації, уникаючи надлишкових витрат на синхронізацію.

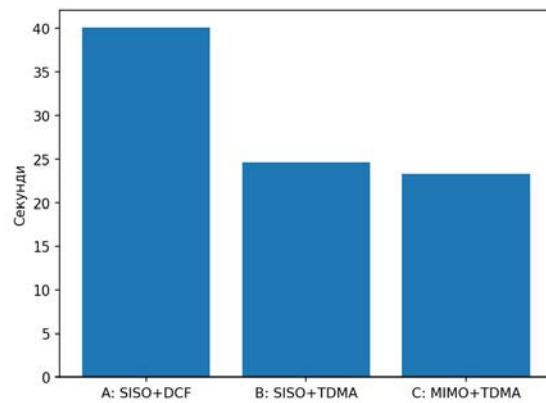


Рис. 5. Тривалість обслуговування всіх кластерів при одноразовому обході збирачем

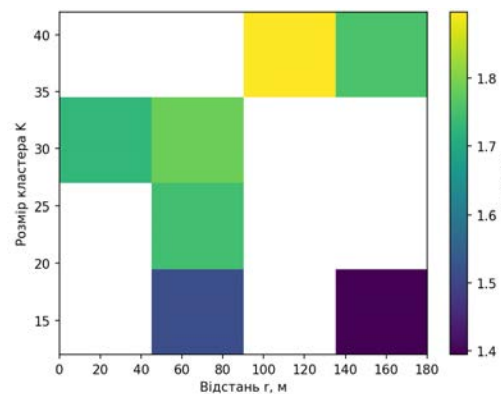


Рис. 6. Середній вигравш за часом $GT(A \rightarrow C)$ залежно від розміру кластера та відстані до збирача

Таблиця 1

Порівняльні показники ефективності для сценаріїв А, В, С

Показник	Значення
Середній час контакту А, с	0.0835
Середній час контакту В, с	0.0513
Середній час контакту С, с	0.0485
Середня енергія на вузол А, Дж	0.011849
Середня енергія на вузол В, Дж	0.011855
Середня енергія на вузол С, Дж	0.011863
Вигравш за часом $GT(A \rightarrow C)$	1.714
Вигравш за енергією $GE(A \rightarrow C)$	0.999
Пропускна здатність системи А, Мбіт/с	73.216
Пропускна здатність системи В, Мбіт/с	119.125
Пропускна здатність системи С, Мбіт/с	125.921
Енергія на біт А, нДж/біт	1.938
Енергія на біт В, нДж/біт	1.939
Енергія на біт С, нДж/біт	1.941
Час обслуговування всіх кластерів А, с	40.0
Час обслуговування всіх кластерів В, с	24.0
Час обслуговування всіх кластерів С, с	23.0

Інтерпретація результатів. Згідно з табл. 1, перехід від DCF (А) до слотованого TDMA (В) забезпе-

чує скорочення середнього часу контакту приблизно на 40%, що відповідає ліквідації колізій і втрат на повторні передавання. Запропонований метод (C) дає додаткове зменшення часу ще на 5–7% і збільшує пропускну здатність системи до 125.9 Мбіт/с, зберігаючи при цьому практично незмінне енергоспоживання вузлів. Це свідчить про те, що адаптивний вибір режиму МІМО дозволяє підвищити ефективність системи без зростання енергетичних витрат.

Висновки. Інтеграція технології МІМО у процес збору даних МСМ із слотованим доступом і вибірковою кооперацією забезпечує істотне прискорення збору без помітного збільшення енерговитрат [7]. За результатами моделювання, середній час контакту зменшився з 0.0835 с (SISO+DCF) до 0.0485 с (MIMO+TDMA), що відповідає інтегральному виграшу за часом

$$GT(A \rightarrow C) = 1.7134.$$

Продуктивність системи також істотно зростає: пропускну здатність системи підвищилася з 73.216 до 125.921 Мбіт/с (понад +70% відносно колізійного доступу та приблизно +6% понад SISO+TDMA). Сумарний час обслуговування всіх кластерів скоротився з 40 с до 23 с ($\approx -42.5\%$).

Енергоефективність залишилася на рівні базових конфігурацій: середня енергія на вузол становить близько 0.01185 Дж, а енергія на біт – ≈ 1.94 нДж/біт. Відносний показник:

$$G_E(A \rightarrow C) = 0.999$$

свідчить про відсутність енергетичних втрат при досягненні часових і пропускнух вигравів.

Відносний ефект зростає зі збільшенням відстані до збирача та розміру кластера, коли режими рознесення й променеформування, а за потреби – вибіркова кооперація, ефективніше компенсують завмирання та втрати потужності на шляху. У ближчій зоні система переважно обирає простіші просторові режими, уникаючи надмірних накладних витрат на CSI та синхронізацію.

Отримані результати підтверджують практичну придатність запропонованого методу для МСМ із жорсткими вимогами до оперативності та надійності, зокрема в задачах моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, технічного та екологічного спостереження. Метод забезпечує зменшення часу збору даних і збільшення пропускну здатності системи без зростання енергоспоживання вузлів.

Список літератури:

1. Telatar E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. *European Transactions on Telecommunications*. 1999. vol. 10. no. 6. pp. 585–595.
2. Alamouti S. M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*. 1998. vol. 16, no. 8. pp. 1451–1458.
3. Heath R. W., Lozano A. Foundations of MIMO Communication. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 432 p.
4. Jayaweera S. K. Virtual MIMO-Based Cooperative Communication for Energy-Constrained Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2006.
5. Islam M. R., Sheikh M. U., et al. Cooperative MIMO Communication at Wireless Sensor Network: An Overview. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2012. Article ID 341.
6. Jindal N. MIMO Broadcast Channels with Finite-Rate Feedback. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006. vol. 52. no. 11. pp. 5045–5060.
7. Тимофеев Є.М., Лисенко О.І. Метод застосування технології МІМО для підвищення пропускну здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*, серія “Технічні науки”. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», Том 36 (75) № 4. 2025.
8. Love D. J., Heath R. W., Lau V. K. N., Gesbert D., Rao B. D., Andrews M. An Overview of Limited Feedback in Wireless Communication Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2008. vol. 26. no. 8. pp. 1341–1365.
9. Tymofeiev Y., Lysenko O., Yavisiya V., Novikov V. Enhancing the performance of mobile sensor networks through cooperative MIMO. Mechanisms of Development... XL Int. Sci. And pract. Conf. (Sept. 25-27 2024, Salzburg, Austria). – Salzburg : ISU, 2024. pp. 77–79.
10. IEEE Std 802.11-2016. Wireless LAN MAC/PHY Specifications. Consolidated edition with MIMO support.
11. Hassibi B., Hochwald B. M. How Much Training is Needed in Multiple-Antenna Wireless Links? *IEEE Transactions on Information Theory*. 2003. vol. 49. no. 4. pp. 951–963.
12. Heinzelman W. B., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 2000.
13. Shah R. C., Roy S., Jain S., Brunette W. Data MULEs: Modeling a Three-Tier Architecture for Sparse Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*. 2003. vol. 1, no. 2–3, pp. 215–233.

Tymofeiev Ye.M., Lysenko O.I. METHOD FOR APPLYING MIMO TECHNOLOGY TO THE PROBLEM OF INFORMATION COLLECTION IN MOBILE SENSOR NETWORKS

The article is devoted to improving the efficiency of information collection in MSNs through the use of multi-antenna MIMO technology at the physical and data link layers. Particular attention is given to the comprehensive interaction of protocols that ensure coordination between network layers. A cross-layer approach is proposed, in which MIMO modes are aligned with the network topology, the mobility of nodes or the TAP, as well as with the MAC scheme. The main idea is adaptive switching between MIMO modes depending on the current radio channel conditions and control objectives: increasing reception reliability, reducing node energy consumption, or minimizing data collection time.

The proposed method combines channel state estimation considering mobility and limited resources; MIMO mode selection based on delay–energy–reliability criteria; and MIMO-adaptive scheduling with prioritization of nodes in poor radio conditions. It also incorporates a compact access scheduling scheme, where slot and power parameters are matched to the instantaneous MIMO throughput to avoid collisions and redundant retransmissions. Additionally, feedback mechanisms are considered to ensure the stability of the algorithm under rapid channel variations.

The evaluation methodology includes an analytical framework linking MIMO information rate to data collection time and the node energy model, as well as simulation scenarios for uniform and clustered deployments, different mobility speeds, and traffic loads. Comparisons with non-MIMO schemes demonstrate the expected improvements: reduced collection time due to spatial parallelism, enhanced robustness against fading in dynamic channels, and lower energy consumption through directional beamforming and power control. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach in both model-based and real deployment scenarios.

The proposed solution is not tied to a specific routing protocol and can be integrated into existing data collection systems as an add-on layer that provides a tunable balance between performance, reliability, and network lifetime. The practical value lies in its applicability to the monitoring of critical infrastructure and field-deployed sensor systems with limited energy and intermittent connectivity.

Key words: mobile sensor networks, wireless sensor networks, MIMO, spatial diversity, beamforming, spatial multiplexing, cooperative MIMO, access scheduling, energy efficiency, simulation modeling.

Дата надходження статті: 29.11.2025

Дата прийняття статті: 17.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.316(477):303.444

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/18>

Малогулко Ю.В.

Вінницький національний технічний університет

Тептя В.В.

Вінницький національний технічний університет

Остра Н.В.

Вінницький національний технічний університет

Сікорська О.В.

Вінницький національний технічний університет

Затхей К.О.

Вінницький національний технічний університет

КЛЮЧОВА РОЛЬ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У ПІСЛЯВОЄННІЙ ВІДБУДОВІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

Метою дослідження є обґрунтування технічних, організаційних та цифрових рішень, здатних підвищити стійкість і надійність розподільних електричних мереж України в умовах післявоєнного відновлення. Методика роботи поєднує статистичний аналіз офіційних даних Міністерства енергетики України, НКРЕКП та операторів систем розподілу з порівнянням міжнародних рекомендацій Європейської комісії, ENTSO-E, IEEE та CIGRE. Дослідження показало суттєве скорочення довжини мереж 0,4–10 кВ – з 7,8 тис. км у 2022 р. до 2,4 тис. км у 2025 р., а також зменшення кількості трансформаторних підстанцій з 340 до 120. Коефіцієнти використання пропускної спроможності у великих регіонах (Київському та Харківському) стабільно перевищували 89–91 %, що свідчило про високе навантаження мереж. Показники SAIDI та SAIFI у 2022 році становили відповідно 1200 хв та 4,1 відключення на одного споживача – у 7–9 разів гірше від середньоєвропейських значень; лише до 2025 р. вони покращилися до 850 хв та 3,2 відключення. Потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які різко знизилися у 2023 році, відновилися до рівня 7,7 ГВт у 2025 р., однак загальний рівень системного навантаження залишався підвищеним. Аналіз досвіду країн ЄС засвідчив, що впровадження Smart Grid-рішень дозволяє зменшувати тривалість та частоту відключень на 18–38 %, а інтеграція систем накопичення енергії значно підвищує керованість мереж. Зроблено висновок, що модернізація українських розподільних систем повинна базуватися на комплексному підході, який поєднує цифровізацію, впровадження енергетичних сховищ та оновлення фізичної інфраструктури. Практична цінність роботи полягає у формуванні кількісно підтвердженої бази для стратегічного планування відновлення електричних мереж, яка може бути використана енергетичними компаніями, державними органами та міжнародними партнерами.

Ключові слова: стійкість електропостачання, гнучкість технологій, автоматизація керування, відновлювані джерела, інтелектуальні системи управління, мікрогриди, кіберзахист.

Постановка проблеми. Повномасштабна військова агресія росії проти України спричинила масштабні руйнування розподільних електричних мереж, що істотно послабило їхню надійність

і стійкість. Ситуацію ускладнили високий рівень фізичного зносу обладнання, недостатнє резервування схем живлення, залежність від великих централізованих підстанцій та обмежена інтегра-

© Малогулко Ю.В., Тептя В.В., Остра Н.В., Сікорська О.В., Затхей К.О., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

ція сучасних технологічних рішень. Сукупність цих факторів різко підвищила вразливість мереж до пошкоджень. У результаті індикатори SAIDI (середня тривалість перерв електропостачання) та SAIFI (частота відключень на одного споживача) значно перевищували середні показники країн ЄС, що свідчило про критичний стан мережевої інфраструктури та потребу в її модернізації.

Подолання виявлених обмежень створює передумови для суттєвого зміцнення енергосистеми. Зокрема, інтеграція відновлюваних джерел енергії (Renewable Energy Sources, RES) [1], запровадження систем накопичення енергії (Energy Storage Systems, ESS) [2] та розгортання технологій Smart Grid [3] забезпечують можливість підвищення надійності та гнучкості мереж. Такі рішення здатні зменшити чутливість до збурень, підвищити автономність окремих ділянок, скоротити тривалість і частоту відключень та сформувати більш адаптивну модель функціонування електричних систем у післявоєнний період.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових джерел показує, що сучасні дослідження у сфері розподільних мереж зосереджені на їх технічній оптимізації, інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищенні стійкості інфраструктури. У роботі Z. Javid et al. [4] систематизовано напрями розвитку мереж з урахуванням цифровізації та зростання частки відновлюваної генерації, підкреслено важливість децентралізації та інтелектуальних технологій. Дослідження Y. Cao et al. [5] демонструє, що впровадження квантових комунікацій, зокрема технології розподілу квантових ключів, здатне істотно знизити ризики кібератак та підвищити кіберстійкість енергосистем. У роботі X. Li et al. [6] доведено, що кооперативне керування системами накопичення енергії та фотоелектричними станціями підвищує здатність мережі протистояти піковим навантаженням. Результати S. Fatima et al. [7] вказують на розрив між технічно можливою та економічно виправданою інтеграцією фотоелектричних систем, що створює додаткові виклики для розподільних мереж.

Вагомий внесок у методологію інженерного планування представлено у монографії T. Gönen et al. [8], де узагальнено сучасні принципи проектування та експлуатації мереж і наголошено на необхідності їх поєднання з цифровими технологіями. Робота P. Rai et al. [9] показала, що методи глибинного навчання, зокрема convolutional neural networks, забезпечують значно вищу точність класифікації аварій у мережах із децентралізованими

генераторами порівняно з класичними методами. У дослідженні J. Hu et al. [10] доведено, що оптимізоване керування energy hubs із високою частотою розподілених джерел покращує балансування та зменшує ризик перевантаження міських мереж. Додатково, у роботі M. Eissa et al. [11] демонструється універсальність методів principal component analysis, які можуть бути адаптовані для моніторингу в енергетичних системах.

Окремий напрям наукових досліджень стосується саме українських реалій воєнного періоду. У роботі I. Kosse [12] наголошено, що відбудова інфраструктури має ґрунтуватися не на відтворенні довоєнного стану, а на модернізації, яка забезпечує довготривалу стійкість. Дослідження T. S. Popik [13] показало, що функціонування енергетичних мереж під час активних бойових дій стало можливим завдяки оперативним рішенням операторів та швидкій локалізації пошкоджень. Важливість взаємозалежності між енергетичною, транспортною та комунікаційною інфраструктурою доведено у роботі S. Aebi et al. [14], де встановлено, що руйнування в одній сфері спричиняє лавиноподібний ефект у пов'язаних секторах. Дослідження I. Holovko та C. Naug [15] підкреслило перспективність «зеленої» відбудови України, адже інтеграція RES та ESS зміцнює енергетичну безпеку й формує основу для сталого розвитку.

Узагальнення цих праць виявило кілька нерозв'язаних проблем. По-перше, бракує системного аналізу того, як саме руйнування розподільних мереж впливають на загальну стійкість енергосистеми. По-друге, недостатньо досліджено кількісні ефекти від застосування технологій Smart Grid [3] та digital twins [16] у процесах післявоєнної відбудови. По-третє, існуючі дослідження RES та ESS переважно зосереджені на технічних або економічних аспектах, тоді як питання їх адаптації до умов масштабних руйнувань, нерівномірного попиту й воєнної невизначеності залишалося поза увагою. Тому актуальною є потреба у створенні комплексної моделі відновлення розподільних мереж, яка одночасно враховуватиме технічні, організаційні та безпекові чинники.

Постановка завдання. У дослідженні необхідно обґрунтувати технічні, організаційні та цифрові рішення, що сприятимуть підвищенню стійкості й надійності розподільних електричних мереж України в умовах післявоєнного відновлення. Для досягнення цієї мети передбачається дослідити стан і вразливість мереж на основі статистичних даних та показників SAIDI

і SAIFI, визначити умови інтеграції відновлюваних джерел енергії й систем накопичення, а також проаналізувати потенціал цифрових технологій, включно з Smart Grid та digital twins, як бази для формування нової архітектури енергетичної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. Дослідження охоплює період 2022–2025 років, включаючи етапи масштабних воєнних руйнувань, початкову відбудову енергетичної інфраструктури та впровадження цифрових рішень. Об'єктом аналізу стали розподільні електричні мережі України, які виявилися найбільш вразливими до зовнішніх впливів і водночас критично важливими для забезпечення безперервного електропостачання.

Аналіз охоплював Київський, Харківський і Львівський регіони, що дало змогу врахувати три типові сценарії: високе навантаження та стратегічне значення (Київ), максимальні руйнування (Харків), відносна стабільність і активний розвиток ВДЕ (Львів). Для кількісної оцінки пошкоджень застосовувалися статистичні методи, що дозволили визначити масштаби втрат ЛЕП різних класів напруги, трансформаторних підстанцій та РП у 2022–2025 рр. Порівняння показників SAIDI та SAIFI із середньоєвропейськими значеннями продемонструвало суттєвий рівень відставання українських мереж. Подальша оцінка потенціалу модернізації проводилася шляхом аналізу впливу впровадження Smart Grid [2], систем накопичення енергії ESS [3] та цифрових двійників digital twins [16] на показники надійності та стійкості. На основі даних операторів систем розподілу та міжнародних звітів було змодельовано ефект цифрових технологій на скорочення тривалості та частоти відключень, а також на здатність системи протистояти кризовим ситуаціям.

Для оцінки технічного стану мереж визначався коефіцієнт використання пропускної спроможності за стандартною формулою, що дозволило кількісно оцінити ступінь навантаження інфраструктури та її резерви:

$$K = \frac{P_f}{P_{\max}} \times 100, \quad (1)$$

де P_f – фактичне навантаження мережі, $P_{\max}$ – пропускна спроможність. Це дозволило кількісно визначити рівень навантаження на мережі та оцінити їхню гнучкість у різні роки.

Стан та вразливість розподільних електричних мереж в умовах воєнних руйнувань

Для оцінки масштабу руйнувань розподільних мереж у 2022–2025 роках було узагальнено статис-

тичні дані щодо ключових елементів інфраструктури. Поділ інформації за роками та типами об'єктів дав змогу простежити динаміку пошкоджень і відновлення, визначити найбільш уразливі компоненти та оцінити ефективність проведених заходів. Представлення цих даних у табличній формі забезпечує структуроване порівняння та створює основу для подальшого аналізу і прогнозування розвитку мереж у середньостроковій перспективі. Таблиця 1 узагальнює кількість пошкоджених елементів різних видів та дозволяє ідентифікувати специфіку впливу воєнних дій на інфраструктуру.

Аналіз узагальнених даних свідчить про поступове зниження кількості нових пошкоджень після пікового навантаження, зафіксованого у 2022 році. Найбільші втрати припадають на сегмент ліній електропередач низької та середньої напруги (0,4–10 кВ), що зумовлено їх значною протяжністю, високою щільністю розташування та вразливістю до зовнішніх впливів. Водночас найбільш критичними залишаються випадки руйнування трансформаторних підстанцій і розподільних пунктів, оскільки навіть обмежена кількість пошкоджень у цих елементах спричиняє масштабні перебої в роботі локальних енергосистем. Спад кількості пошкоджень у 2024–2025 роках можна пояснити як частковим відновленням мережевої інфраструктури, так і зміною характеру атак на енергетичні об'єкти, що зумовило переорієнтацію ризиків. Узагальнені результати підтверджують необхідність комплексного підходу до відбудови розподільних мереж із урахуванням найбільш уразливих сегментів, де пріоритетним має стати підвищення рівня резервування та автоматизації керування.

Для системного обґрунтування технічних особливостей пошкоджень доцільно застосовувати міжнародні підходи до класифікації. Стандарти IEEE та CIGRÉ забезпечують уніфікований опис різних типів руйнувань, що дозволяє порівнювати результати українських спостережень із глобальною практикою. Адаптація цих підходів у 2022–2025 роках створює підґрунтя для коректної інтерпретації характеру пошкоджень і визначення їхнього впливу на технічні параметри функціонування енергосистеми. Представлення класифікаційних підходів у табличній формі (таблиця 2) забезпечує можливість не лише систематизації інформації, але й розробки практичних рекомендацій щодо пріоритетів відновлення критичних елементів інфраструктури.

Аналіз даних таблиці 2 показує, що найбільш небезпечними для роботи енергосистеми є повні

руйнування та системні відмови, оскільки вони спричиняють масштабні знеструмлення і потребують повної заміни обладнання, що супроводжується значними часовими та фінансовими витратами. Часткові пошкодження та функціональні відмови мають менш руйнівний характер, однак істотно впливають на стабільність роботи мережі, підвищуючи ризик каскадних аварій та знижуючи надійність електропостачання. Вторинні пошкодження, що виникають унаслідок супутніх чинників, ускладнюють локалізацію аварій та затримують відновлення.

Використання міжнародних класифікацій згідно зі стандартами IEEE та CIGRÉ дозволяє систематизувати український досвід і включити його до глобальної практики аналізу технічних пошкоджень. Це створює основу для подальшої оптимізації рішень у сфері відновлення інфраструктури.

Зведений аналіз підтверджує, що процес відновлення розподільних мереж не може обмежуватися лише ліквідацією наслідків воєнних руйнувань. Значний вплив мають внутрішні технічні обмеження, сформовані ще до початку повномасштабного вторгнення: високий рівень фізичного зношення, недостатнє резервування пропускної

спроможності та залежність від централізованих вузлів. Це визначає необхідність перегляду підходів до модернізації, формування нових вимог до показників надійності та впровадження технічних рішень, спрямованих на довгострокове підвищення стійкості. Такий підхід розглядає відбудову не як відтворення старої мережі, а як створення більш гнучкої, розподіленої та технологічно стійкої інфраструктури.

Технічні параметри та модернізаційні потреби розподільних мереж

Динаміка змін технічних параметрів розподільних електричних мереж упродовж 2022–2025 років свідчить про поєднання кількох процесів: скорочення пропускної спроможності через пошкодження обладнання, часткове відновлення інфраструктури у відносно безпечних регіонах та впровадження технічних заходів для підвищення гнучкості роботи мереж. У цих умовах співвідношення навантаження до пропускної спроможності виступає показником, що дозволяє оцінити стійкість системи на регіональному рівні та визначити найбільш уразливі сегменти. Представлена таблиця 3 містить дані щодо Київського, Харківського та Львівського регіонів, які відображають різні умови функціонування енергетичної

Таблиця 1

Пошкодження об'єктів розподільних електричних мереж України у 2022–2025 рр.

Рік	Лінії електропередач 0,4–10 кВ, км	Лінії електропередач 35–150 кВ, км	Трансформаторні підстанції (шт.)	Розподільні пункти (шт.)
2022	7 800	2 450	340	210
2023	5 200	1 900	275	185
2024	3 600	1 300	190	140
2025	2 400	900	120	95

Таблиця 2

Класифікація пошкоджень розподільних електричних мереж за стандартами IEEE та CIGRÉ з прикладами застосування для України

Категорія пошкоджень (за IEEE/CIGRÉ)	Характеристика пошкодження	Типові приклади для України (2022–2025 рр.)	Технічні наслідки
Повні руйнування обладнання (complete failure)	Повна втрата функціональності елемента, необхідність заміни	Знищення трансформаторних підстанцій у центральних та північних областях	Переривання живлення значних територій, потреба у заміні обладнання
Часткові пошкодження (partial damage)	Пошкодження елементів конструкції або ізоляції, можливість ремонту	Обриви та пошкодження ізоляції на лініях 35–150 кВ	Тимчасове зниження пропускної спроможності, збільшення аварійності
Функціональні відмови (functional failures)	Порушення режиму роботи без видимих механічних руйнувань	Вихід з ладу комутаційних пристроїв унаслідок перевантаження	Нестабільність роботи мережі, зростання ризику каскадних відключень
Системні порушення (system disturbances)	Масове відключення елементів унаслідок зовнішніх впливів	Синхронні пошкодження кількох ліній унаслідок масованих обстрілів	Дестабілізація локальних та регіональних енергосистем
Вторинні пошкодження (secondary damages)	Ушкодження, спричинені непрямими факторами (пожежі, перевантаження)	Займання на розподільних пунктах після ударів по суміжних об'єктах	Додаткові втрати обладнання, ускладнення відновлювальних робіт

інфраструктури, а також демонструють специфіку використання пропускної спроможності у контексті її обмежень. Це дозволяє виокремити критичні зони, де коефіцієнт використання залишається стабільно високим, створюючи додаткові ризики для стійкості системи.

Аналіз даних таблиці 3 свідчить, що у досліджуваний період у всіх трьох регіонах коефіцієнт використання пропускної спроможності залишався на високому рівні – від 84 % до 91 %. Це свідчить про постійне наближення фактичного навантаження до граничних технічних можливостей мережі, що створює додаткові ризики перевантаження та зниження надійності. Київський регіон демонстрував стабільно найвищі показники через значну концентрацію споживачів та критичну потребу у безперебійному енергопостачанні. У Харківському регіоні простежувалося поступове скорочення пропускної спроможності з 2022 по 2025 рік, що безпосередньо пов'язано з масштабними пошкодженнями та неповним відновленням інфраструктури. Львівський регіон мав відносно нижчий рівень коефіцієнта використання, однак навіть там спостерігалось стале високонавантажене функціонування, що підкреслює обмеженість резервів у системі. Узагальнені результати підтверджують потребу у розши-

ренні пропускної спроможності та впровадженні модернізаційних рішень для зниження технічних ризиків.

У подальшому аналізі особливе значення мають показники SAIDI та SAIFI, які є міжнародно визнаними індикаторами надійності електропостачання. В умовах воєнних дій в Україні ці індикатори демонстрували суттєві відхилення від середніх значень у Німеччині, Франції, Італії, Іспанії та Польщі, що вказувало на істотне погіршення стабільності функціонування енергосистеми. Простеження їхньої динаміки у 2022–2025 роках (таблиця 4) дозволило кількісно визначити масштаби технічного відставання та аргументувати необхідність прискореної модернізації, зокрема через інтеграцію цифрових технологій та інтелектуальних систем управління.

Аналіз даних таблиці свідчить, що у 2022 році в Україні відбулося істотне погіршення якості електропостачання: середня тривалість відключень (SAIDI) у дев'ять разів перевищувала середні показники країн ЄС, тоді як середня кількість відключень (SAIFI) була більш ніж утричі вищою. У наступні роки простежувалася поступова позитивна динаміка, що відображає ефективність адаптаційних заходів операторів систем розподілу та результати відновлювальних робіт. Однак навіть

Таблиця 3

Пропускна спроможність і фактичне навантаження розподільних мереж України у 2022–2025 рр. (за регіонами)

Рік	Регіон	Пропускна спроможність, МВт	Фактичне середнє навантаження, МВт	Коефіцієнт використання (%)
2022	Київський	6 500	5 900	91
	Харківський	5 200	4 650	89
	Львівський	4 700	3 950	84
2023	Київський	6 400	5 800	91
	Харківський	4 800	4 350	91
	Львівський	4 600	3 950	86
2024	Київський	6 300	5 600	89
	Харківський	4 500	4 050	90
	Львівський	4 550	3 850	85
2025	Київський	6 200	5 500	89
	Харківський	4 400	3 950	90
	Львівський	4 500	3 800	84

Таблиця 4

Динаміка показників SAIDI та SAIFI в Україні у 2022–2025 рр. у порівнянні з середніми значеннями країн ЄС

Рік	Україна: SAIDI (хв/спож/рік)	Україна: SAIFI (відкл/спож/рік)	Середні показники ЄС: SAIDI (хв/спож/рік)	Середні показники ЄС: SAIFI (відкл/спож/рік)
2022	1 200	4,1	135	1,0
2023	1 050	3,8	130	1,0
2024	950	3,5	125	0,9
2025	850	3,2	120	0,9

у 2025 році обидва індикатори залишалися більше ніж удвічі гіршими за середньоєвропейські, що свідчить про системні структурні проблеми вітчизняної енергетичної інфраструктури. Встановлені відхилення підкреслюють необхідність цілеспрямованої модернізації, орієнтованої на впровадження цифрових технологій, автоматизованих систем керування та інтелектуальних рішень Smart Grid [3], здатних мінімізувати тривалість та частоту перерв у постачанні електроенергії.

Підвищена аварійність проявлялася у зростанні кількості аварійних відключень у 2022–2024 роках, що відображало нестабільність функціонування розподільних мереж у період активних воєнних дій. Основними чинниками стали пошкодження обладнання, перевантаження мережевих елементів та функціональні відмови, що значно знижували рівень надійності постачання. У цих умовах пріоритетного значення набуває модернізація систем керування та захисту, здатних забезпечувати автоматичне реагування на критичні відхилення. Використання цифрових технологій у діагностиці та моніторингу стану мережі дозволило зменшити середню тривалість відключень (SAIDI) з 1 200 хвилин у 2022 році до 850 хвилин у 2025 році, тобто на 350 хвилин. Одночасно середня кількість відключень на одного споживача (SAIFI) скоротилася з 4,1 до 3,2, що свідчить про поступове підвищення стійкості енергосистеми до зовнішніх впливів.

Технологічним фундаментом подальшої модернізації розподільних мереж виступала концепція Smart Grid, яка передбачала перехід до інтелектуально керованих систем. Такі мережі здатні в режимі реального часу балансувати навантаження, інтегрувати відновлювані джерела енергії та системи накопичення, а також забезпечувати узгоджену взаємодію між різними рівнями енергетичної інфраструктури. Для України інтеграція цих технологій має стратегічне значення, оскільки дозволяє водночас зміцнити стійкість мереж і створити умови для подальшої інтеграції до європейської енергосистеми.

Поступове впровадження цифрових платформ керування, систем прогнозової аналітики та інтеграція локальної генерації формують передумови для трансформації традиційної моделі функціонування розподільних мереж. Одночасно стабільно високі коефіцієнти використання пропускної спроможності підтверджують необхідність підвищення адаптивності мереж до зовнішніх загроз і створення умов для розвитку децентралізованої генерації. Таким чином, дослідження технічних параметрів і визначення модернізаційних потреб

підтверджують, що стійкий розвиток розподільних мереж можливий лише за умов комплексної цифровізації та впровадження інтелектуальних технологічних рішень.

Перспективи цифровізації та підвищення стійкості розподільних мереж. У процесі цифровізації енергетичних систем провідне місце посідає впровадження технологій Smart Grid [3], що забезпечують інтеграцію автоматизованих комутаційних пристроїв, систем дистанційного моніторингу та прогнозової аналітики у єдину керовану структуру. Такі рішення доводять свою ефективність у скороченні часу відновлення після аварій, забезпеченні більш рівномірного розподілу навантаження та зменшенні технічних втрат у мережі. Досвід країн Європейського Союзу підтверджує, що широке застосування Smart Grid безпосередньо впливає на підвищення надійності функціонування розподільних мереж і якість електропостачання для кінцевих споживачів. Особливе значення в оцінці ефективності цих рішень мають показники SAIDI та SAIFI, які дозволяють кількісно зафіксувати зміни у тривалості та частоті відключень.

Систематизація міжнародного досвіду у табличній формі забезпечує можливість узагальнення різних моделей реалізації Smart Grid [3] та порівняння їхніх результатів за ключовими індикаторами надійності. Представлені приклади демонструють, що впровадження цифрових технологій у розподільних мережах дозволяє істотно скоротити тривалість і частоту перерв у постачанні електроенергії, а також створює основу для інтеграції відновлюваних джерел у мережеву інфраструктуру. Наведена таблиця 5 відображає результати застосування Smart Grid [3] у країнах ЄС та їхній вплив на показники надійності електропостачання, що формує практичну базу для адаптації цих рішень в українських умовах.

Аналіз даних таблиці 5 підтверджує, що впровадження технологій Smart Grid у країнах ЄС забезпечило істотне зниження показників SAIDI та SAIFI, які є ключовими індикаторами надійності електропостачання. Найбільш виражений ефект продемонстровано в Іспанії, де застосування прогнозової аналітики у поєднанні з інтелектуальними сенсорами дозволило скоротити SAIDI на 38 %. У Німеччині та Італії головним чинником покращення стало широке використання інтелектуальних лічильників і автоматизованих підстанцій, що сприяло одночасному зменшенню як тривалості, так і частоти відключень. Франція підтвердила ефективність систем керування навантаженнями,

які забезпечили підвищення стабільності мереж та полегшили інтеграцію RES. Польський досвід демонструє, що поєднання SCADA із сучасними комутаційними пристроями створює передумови для підвищення надійності та активного розвитку мікрогридів. Сукупність цих прикладів доводить, що цифровізація розподільних мереж є ефективним інструментом підвищення їх стійкості, а адаптація аналогічних рішень в Україні може забезпечити істотне покращення якості електропостачання.

Наступним кроком цифрової трансформації енергетики виступає впровадження технології digital twins [16], яка дає змогу створювати віртуальні моделі реальних об'єктів та процесів для їх комплексного аналізу. Використання таких моделей відкриває можливості для оптимізації

режимів роботи, прогнозування потенційних відмов і випробування різних сценаріїв без ризику для фізичної інфраструктури. Практика країн ЄС і США підтверджує ефективність digital twins [16] у різних сферах – від інтеграції відновлюваних джерел енергії до забезпечення кіберстійкості енергосистем. Узагальнені приклади наведено у таблиці 6, яка демонструє ключові результати практичного використання цієї технології у розподільних мережах та окреслює перспективи її адаптації для України.

Технологія digital twins поступово перетворюється на універсальний інструмент управління енергетичними системами. Нідерланди демонструють її ефективність у прискоренні аварійного реагування та оптимізації розподілу навантаження. У Німеччині цифрові близнюки

Таблиця 5

Приклади впровадження технологій Smart Grid у країнах ЄС та їх вплив на показники SAIDI і SAIFI

Країна / регіон	Рік впров.	Основні технології Smart Grid	Зміна SAIDI (хв/сп/рік)	Зміна SAIFI (відкл/спож/рік)	Ключові результати
Німеччина (Північний Рейн-Вестфалія)	2019	Інтелектуальні лічильники, автоматизовані підстанції	–35 %	–28 %	Підвищення надійності, швидке відновлення після аварій
Італія (Ломбардія)	2020	Smart meters, системи віддаленого моніторингу	–32 %	–25 %	Зменшення аварійності та витрат на технічне обслуговування
Франція (О-де-Франс)	2021	Автоматизовані системи керування навантаженнями	–30 %	–20 %	Оптимізація режимів роботи та інтеграція RES
Іспанія (Каталонія)	2022	Smart sensors, системи прогнозової аналітики	–38 %	–27 %	Зниження пікових навантажень, скорочення часу ліквідації аварій
Польща (Мазове-цьке воєводство)	2022	Автоматизовані комутаційні пристрої, SCADA	–29 %	–18 %	Підвищення стабільності мереж та інтеграція мікрогридів

Таблиця 6

Приклади застосування технології digital twins у країнах ЄС та США

Країна / регіон	Рік впровадження	Сфера використання	Отримані результати
Нідерланди	2020	Моделювання роботи розподільних мереж	Скорочення часу ліквідації аварій на 25 %, оптимізація потоків навантаження
Німеччина	2021	Інтеграція відновлюваних джерел енергії (RES)	Підвищення точності прогнозування балансів на 20 %, зниження випадків перевантаження
Франція	2021	Планування модернізації інфраструктури	Зменшення витрат на технічне обслуговування на 15 %, підвищення ефективності інвестицій
США (Нью-Йорк)	2022	Тестування сценаріїв кіберзахисту	Зниження ризику успішних атак на критичну інфраструктуру на 40 %
США (Техас)	2023	Оптимізація роботи мікрогридів	Підвищення стабільності локальних мереж, скорочення відключень на 18 %

підвищують точність прогнозування енергобалансів і зменшують ризик перевантажень під час інтеграції ВДЕ. Франція підтверджує економічну доцільність підходу завдяки зниженню витрат на техобслуговування та підвищенню ефективності модернізації. Американський досвід акцентує на ключових аспектах: у Нью-Йорку – кіберзахист, де цифрові близнюки зменшили ризики кібератак майже вдвічі; у Техасі – стабільність мікрогридів, що привело до зниження кількості відключень. У сукупності це доводить, що digital twins мають комплексний ефект – від підвищення технічної надійності до зміцнення кіберстійкості – і можуть стати основою модернізації українських розподільних мереж.

Дослідження інтеграції відновлюваних джерел енергії підтвердило перспективність децентралізованої генерації та важливість систем накопичення енергії (ESS) [2] для балансування навантажень. Міжнародний досвід щодо Smart Grid [3] та digital twins [16] у країнах ЄС і США демонструє суттєве скорочення перерв електропостачання, підвищення кіберстійкості та економічну ефективність інвестицій. Отримані результати свідчать, що цифровізація та активний розвиток відновлюваної генерації є ключовими умовами підвищення стійкості українських розподільних мереж у середньо- та довгостроковій перспективі.

Висновки. У 2022–2025 роках воєнні атаки спричинили значне зниження ефективності роботи розподільних мереж України. Довжина

ліній 0,4–10 кВ скоротилася з 7,8 тис. км до 2,4 тис. км, кількість трансформаторних підстанцій – з 340 до 120, а розподільних пунктів – із 210 до 95. Це призвело до різкого зростання навантаження на збережені об'єкти та підвищення коефіцієнтів використання пропускної спроможності до критичних 84–91 %.

Індекси надійності електропостачання демонстрували суттєве погіршення якості роботи мереж: SAIDI у 2022 році сягав 1200 хв/спож/рік, що майже у дев'ять разів перевищувало середньоєвропейські значення, SAIFI – у чотири рази (4,1 проти 1,0). До 2025 року ці показники вдалося знизити до 850 хв та 3,2 відключення на споживача, проте вони залишалися значно вищими за європейські стандарти.

Міжнародний досвід довів високу ефективність цифрових рішень: застосування технологій Smart Grid дозволяло зменшити SAIDI на 29–38 %, SAIFI – на 18–28 %. Це свідчить про необхідність прискореного впровадження систем автоматизації, накопичення енергії та інтелектуальних платформ керування в Україні.

Обмеження дослідження пов'язані з частковою відсутністю статистичних даних та зосередженням аналізу лише на трьох регіонах. Водночас отримані результати визначають ключові напрями подальшого розвитку: розширення ESS, цифровізація мереж, створення мікрогридів і посилення кіберзахисту як основи післявоєнної модернізації енергетичної системи.

Список літератури:

1. Pavlovicova S. Renewable energy sources. *Ergon Energy*, 2015. P. 1–10. URL: https://www.psk.sk/files/dokumenty-odborov/O_RR/robinwood/ObnovitelneZdrojeEnergie_Aj.pdf
2. Mitali J., Dhinakaran S., Mohamad A. A. Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*. 2022. Vol. 1, No. 3. P. 166–216. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277268352200022X>
3. Moreno Escobar J. J. et al. A comprehensive review on smart grids: Challenges and opportunities. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 21. P. 6978. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/21/6978>
4. Javid Z. et al. Future distribution networks: A review. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 8. P. 1822. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/8/1822>
5. Cao Y. et al. The evolution of quantum key distribution networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, No. 2. P. 839–894. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9684555>
6. Li X. et al. Cooperative dispatch of distributed energy storage in distribution network with PV generation systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021. Vol. 31, No. 8. P. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9560020>
7. Fatima S. et al. Comparison of economical and technical photovoltaic hosting capacity limits in distribution networks. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 9. P. 2405. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2405>
8. Gönen T., Ten C. W., Mehrizi-Sani A. Electric power distribution engineering. CRC Press, 2024. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781003129721/electric-power-distribution-engineering-turan-g%C3%B6nen-chee-wooi-ten-ali-mehrizi-sani>
9. Rai P. et al. Fault classification in power system distribution network integrated with distributed generators using CNN. *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 192. P. 106914. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779620307124>

10. Hu J. et al. Optimal operation of energy hubs with large-scale distributed energy resources for distribution network congestion management. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2021. Vol. 12, No. 3. P. 1755–1765. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9372881>
11. Eissa M. et al. Principal component analysis in long term assessment of total viable plate count of municipal water distribution network system in healthcare facility. *Environmental Research and Technology*. 2022. Vol. 5, No. 2. P. 165–171. URL: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ert/issue/69971/1062683>
12. Kosse I. Rebuilding Ukraine's infrastructure after the war. *Policy Notes and Reports*. 2023. No. 72. URL: <https://www.econstor.eu/handle/10419/278562>
13. Popik T. S. Preserving Ukraine's electric grid during the Russian invasion. *Journal of Critical Infrastructure Policy*. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 15–55. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.18278/jcip.3.1.3>
14. Aebi S. et al. Critical infrastructure resilience in Ukraine: Energy, transportation, and communication. ETH Zurich, 2024. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/entities/publication/8a858a30-b01b-4d75-bb61-11c6b7d25885>
15. Holovko I., Haug C. Rebuilding Ukraine. Principles of a green post-war reconstruction. Berlin: adelphi consult GmbH, 2023. URL: <https://greendealukraine.org/assets/images/literature/14-rebuilding-ukraine-adelphi-january-2023-final.pdf>
16. Batty M. Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2018. Vol. 45, No. 5. P. 817–820. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/2399808318796416>

Malohulko Yu.V., Teptya V.V., Ostra N.V., Sikorska O.V., Zatkhei K.O. THE KEY ROLE OF DISTRIBUTION NETWORKS IN THE POST-WAR RECONSTRUCTION OF UKRAINE'S ENERGY SYSTEM

The purpose of this study was to substantiate technical, organizational, and digital solutions aimed at improving the resilience and reliability of Ukraine's distribution networks during post-war reconstruction. The research methodology combined statistical analysis of official data from the Ministry of Energy, the national energy regulator, and distribution system operators with a comparative review of international reports issued by the European Commission, ENTSO-E, IEEE, and CIGRE. The findings revealed a significant reduction in the length of low- and medium-voltage networks (0.4–10 kV), which decreased from 7.8 thousand km in 2022 to 2.4 thousand km in 2025, while the number of transformer substations fell from 340 to 120. Capacity utilization factors in major regions such as Kyiv and Kharkiv consistently exceeded 89–91 %, indicating a heavily stressed network. Reliability indicators in 2022 reached 1,200 minutes of average outage duration and 4.1 interruptions per customer—7 to 9 times higher than the European average—and only by 2025 improved to 850 minutes and 3.2 interruptions. Installed capacities of solar and wind power, which declined in 2023, recovered to 7.7 GW by 2025, although overall system stress remained elevated. International experience demonstrated that Smart Grid technologies reduce outage duration and frequency by 18–38 %, while energy storage systems significantly enhance network flexibility. The study concludes that restoring Ukraine's distribution networks requires a comprehensive strategy that integrates infrastructure modernization, deployment of storage systems, and advanced digital management tools. The practical significance lies in providing quantitative guidelines for policymakers, energy companies, and international donors to support the future strengthening and security of Ukraine's energy sector.

Key words: power supply resilience, technology flexibility, control automation, renewable energy sources, intelligent control systems, microgrids, cybersecurity.

Дата надходження статті: 22.11.2025

Дата прийняття статті: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Рачинський А.Ю.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЕПЛОВІ Й ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ КОТЛА ДКВР-10-13

У статті наведено результати CFD-дослідження процесу спалювання природного газу в паливній камері парового котла ДКВР-10-13 при варіюванні теплового навантаження, оцінці його теплової ефективності та впливу на екологічні показники. Розрахунки виконано у безкоштовній студентській версії ANSYS Student. Метою роботи є прогнозування утворення оксидів азоту (NOx) у котлі ДКВР-10-13 за різних теплових навантажень шляхом CFD-моделювання процесів горіння. Об'єкт дослідження – процеси згоряння газоподібного палива та їх вплив на продуктивність котла. Предмет дослідження – CFD-модель паливної камери котла ДКВР-10-13 зі стандартними пальниками, здатними працювати на рідкому й газоподібному паливі. Застосування методів числового моделювання дало змогу детально проаналізувати гідродинаміку та тепломасообмін, оцінити ефективність горіння й вплив на рівень шкідливих викидів.

Верифікацію моделі проведено на основі опублікованих і верифікованих робіт Харківського національного університету будівництва та архітектури. Відхилення розрахункових даних від експериментальних результатів не перевищує 3 %. Отже, застосована математична модель і вибрана для розрахунків модель турбулентності є адекватними для діапазону режимних параметрів, використаних у цьому дослідженні.

Встановлено, що стандартні пальники котла ДКВР-10-13 не відповідають чинним нормам щодо викидів NOx. Запропоновано їх заміну на струменеві пальники компанії СНТ, що, за результатами моделювання, знижує середній вміст NOx на виході паливної камери приблизно на 20 %. Ефект пояснюється нижчою температурою в зоні активного горіння (≈ 1400 °C проти ≈ 1800 °C для стандартних пальників).

Визначено, що струменево-нішевий пальник забезпечує зменшення утворення NOx за рахунок кращого змішування палива з повітрям і зниження температур у зоні горіння. Використання такого пальника потенційно дозволяє знизити викиди оксидів азоту без погіршення стабільності процесу горіння, що є вагомою перевагою з екологічної точки зору.

Ключові слова: теплообмін, моделювання, спалювання, окисли азоту, факел.

Постановка проблеми. Проблематика спалювання палива та його впливу на довкілля залишається надзвичайно актуальною, адже ефективне згоряння й мінімізація шкідливих викидів є ключовими завданнями сучасної енергетики та екологічної безпеки. У країнах Європейського Союзу спостерігається масова відмова від використання природного газу як палива для теплових електростанцій. Натомість у багатьох азійських державах природний газ і надалі широко застосовується в промисловості та енергетиці завдяки простоті використання й нижчому рівню забруднення порівняно з вугіллям. Представлена робота присвячена CFD-моделюванню стабілізованого горіння без попереднього змішування в пальнику з низьким завихренням при зміні режимів роботи котельного агрегату – від номінального до роботи на 40 % потужності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні більшість опалювальних котелень, збудованих у 1960–1970-х роках, досі експлуатують парові котли типу ДКВР. Ці агрегати відпрацювали понад 40 років і повністю вичерпали свій ресурс. Щоб продовжити термін їхньої служби, робочий тиск у котлах знижують до 0,6–0,8 МПа, а фактично під час експлуатації підтримують лише 1–2 атм. Робота за таких низьких тисків погіршує стійкість циркуляції, зменшує температуру насичення та збільшує частку пароутворення. У екранних трубах інтенсивно утворюється накип і зростає ризик перепау. Крім того, за тиску 1–3 атм через низьку температуру насичення доводиться відключати чавунний водяний економайзер, аби уникнути небажаного пароутворення. У результаті коефіцієнт корисної дії (ККД) таких котлів не перевищує 80–82 %, а за сильного забруднення труб падає до

70–75 %. Тому їх дедалі частіше переводять у водогрійний режим, що потребує регулярних технічних оглядів. Після завершення нормативного ресурсу подальша робота водогрійних котлів дозволяється лише за наявності позитивного висновку експертизи промислової безпеки.

Попри сучасний курс на декарбонізацію енергетики, спалювання вуглеводневого палива залишається ключовим джерелом енергії. Тому реконструкція котелень і зниження шкідливих викидів залишаються актуальними завданнями. У роботі [1] показано, що при спалюванні газу на діючих парових і водогрійних котлах України зменшення об'ємної теплової напруги топки до 55 % номінальної потужності та рециркуляція 17 % димових газів знижують викиди NO_x на 75 %, що майже відповідає вимогам директиви IED.

Подібні результати отримано й на інших установках. Так, на водогрійному котлі КВГМ-180 зі стандартним рециркуляційним димососом рециркуляція близько 30 % димових газів у повітря, що подається на горіння, дала змогу скоротити викиди NO_x на 67 % до рівня європейських стандартів, а вміст CO у димових газах знизився до $< 100 \text{ мг/Нм}^3$ (при 3 % O_2). Стандартні двопотокові пальники цього котла фактично працюють у режимі ступінчастого горіння, поєднаного з рециркуляцією.

Для парового котла ДКВР-6,5-13 досліджували спалювання суміші метану (76 %) та CO_2 (24 %) – умовного «біогазу». Концентрація NO_x у димових газах становила 63–76 мг/Нм^3 (при 3 % O_2), що відповідає нормам ЄС. Проте, слід зазначити, що порівнюючи природний газ з альтернативними горючими газами (генераторним, доменним, шахтним, біогазом) можна зробити головний висновок, про те, що він має найпривабливіші характеристики для застосування його в промисловості в тому числі і в енергетиці. Отже в найближчий час заміна його на альтернативні палива в хімічній, важкій промисловості та енергетиці неможлива.

У дослідженні [2] розглядали стабільність горіння в настінному котлі потужністю 600 МВт за різних комбінацій роботи пальників (OM_1 і OM_2) при 25 % та 35 % навантаження. Виявлено, що режим OM_2 забезпечує рівномірніший розподіл швидкостей і температури, затримує змішування пиловугільного пилу з повітрям та знижує температуру в топці, що сприяє зменшенню утворення NO_x .

Інше дослідження [3] присвячене спільному спалюванню метану в котлі з тангенціальним спалюванням вугілля потужністю 550 МВт. Оптимальне розташування інжектора всередині нафто-

вого отвору дало змогу при 40 % підмішуванні метану скоротити викиди NO_x на 69,8 % без зростання втрат палива.

Не менш показові експерименти описано в [4–6]. Вони доводять, що модернізація пальників – зміна конструкції, впровадження щільних або вихрових конфігурацій, впорскування вторинного чи тангенціального повітря, інтеграція форсунок – здатна значно підвищити стабільність горіння, знизити пікові температури та, як наслідок, скоротити викиди NO_x на 30–50 % і більше без зниження ККД.

Аналіз літератури [7–9] показує: для зменшення шкідливих викидів важливі не лише конструктивні зміни пальників, а й вибір палива. Наприклад, пропан в окремих випадках виявився ефективною альтернативою метану. Численні CFD-дослідження демонструють, що коректне моделювання процесів горіння потребує використання моделі перенесення компонентів (Species Transport) у поєднанні з турбулентною моделлю k-ε та відповідними пристінними функціями. Ці підходи підтверджені як при моделюванні спалювання альтернативних палив, так і під час розрахунків теплообміну в топках котлів різних типів.

Отже, сучасна практика доводить: підвищення ефективності та екологічної безпечності роботи котлів можливе завдяки комплексному підходу, що поєднує модернізацію пальників, рециркуляцію димових газів, оптимізацію режимів горіння й використання методів CFD-аналізу для коректного прогнозування процесів тепломасообміну.

Постановка завдання. Метою статті є прогнозування утворення оксидів азоту (NO_x) у котлі ДКВР-10-13 за різних теплових навантажень шляхом CFD-моделювання процесів горіння.

Метод дослідження – комп'ютерне моделювання течії і теплообміну потоків розжарених газів, що утворюються в паливній котла ДКВР-10-13 внаслідок стабілізованого горіння метану в штатних пальниках ГМГ-4 і пальниках, що виготовлені за струменево-нішевою технологією, які пропонуються для заміни штатних. Комп'ютерне моделювання виконувалось в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, що є абсолютно безкоштовним (з 2015 року) і призначеним для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об'єкт дослідження – процеси згоряння газоподібного палива та їх вплив на продуктивність котла.

Предмет дослідження – CFD-модель паливної камери котла ДКВР-10-13 зі стандартними паль-

никами, здатними працювати на рідкому й газоподібному паливі.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі процес горіння в топковому просторі котла ДКВР-10-13 моделювався в середовищі ANSYS CFX із застосуванням хімічної моделі скінченної інтенсивності (finite-rate chemistry model). Згоряння описувалося однокроковим механізмом реакції (one-step reaction mechanism), у якому реакцію визначали стехіометричні коефіцієнти, ентальпії реагентів та параметри, що впливають на ступінь її протікання.

Ступінь завершеності реакції розраховували, виходячи з припущення, що саме турбулентне перемішування реагентів є головним чинником, який обмежує швидкість хімічного перетворення. Взаємодія турбулентності та хімії описувалася за допомогою моделі вихорової дисипації (eddy-dissipation model). Для обліку процесів перенесення реагентів використовувалася модель перенесення компонентів суміші (species transport model).

Геометрія пальників і топки відтворювалася за допомогою гібридної скінченно-елементної сітки (рис. 1а). Структурована частина сітки враховувала розвиток примежового шару на стінках пальників і котла, тоді як поза цією зоною застосовувалася нерівномірна тетраедрична сітка. При цьому показник скошеності (Skewness) не перевищував 0,8, а співвідношення сторін (Aspect Ratio) елементів було меншим за 40. Щільність розташування вузлів регулювалася параметром Relevance Center з рівнем «Fine», що забезпечувало високу деталізацію. Розмір елементів сітки також визначався цим параметром. Для поєднання структурованих і неструктурованих зон використовувався

метод MultiZone. Попередні тестові розрахунки дозволили підібрати таку густину сітки, за якої подальше її ущільнення вже не впливало на результати.

Створена CFD-модель процесу спалювання газоподібного палива включала рівняння неперервності, осереднені за Рейнольдсом рівняння збереження енергії, імпульсу й маси (рівняння Нав'є-Стокса), а також рівняння перенесення для кожного компоненту газової суміші. Для замикання осереднених рівнянь Нав'є-Стокса було застосовано Realizable k- ϵ модель турбулентності. Система керувальних рівнянь описує течію стисливої в'язкої рідини зі змінними фізичними властивостями, враховує рівняння енергії та баланс компонентів суміші [10].

Комп'ютерна модель пальника, що працює за струменево-нішевою технологією представлена на рис. 1б. Дана конструкція дає змогу поєднати в собі усі стадії робочого процесу пальників такі як: розподіл палива в потоці, утворення суміші з необхідними рівнями концентрацій палива, запалення горючої суміші, стабілізація факелу та формування продуктів згоряння необхідної якості та без шкідливих викидів, термічну підготовку палива та самоохолодження термічно навантажених елементів пальника.

Подача газу в пальник здійснюється в загальний колектор який роздає газ на пілони. Пілони формують роздачу газу через один ряд отворів. Проте, кресленики пальника є комерційною таємницею компанії СНТ [11].

Для того, щоб процес порівняння відбувався в однакових умовах, розрахунки для обох досліджених випадків проводились при однакових граничних умовах.

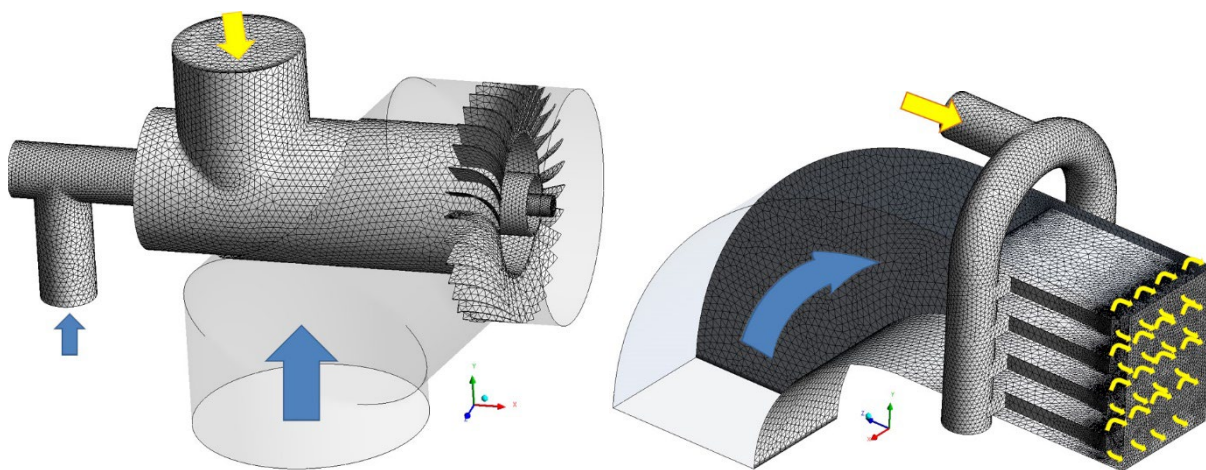


Рис. 1. Комп'ютерна модель штатного пальника ГМГ-4 (а) та пальника, що побудований з використанням струменево-нішевої технології (б)

Верифікація моделі виконана на основі даних [12] де показано, що в жаротрубному котлі з реверсивним факелом збільшення параметра крутки ($n > 1,4$; кут нахилу вихідний лопатки пального $\beta > 40^\circ$) призводить до підвищення температури в ядрі факела, як і в представленій роботі, а його положення зміщується до фронту котла, що призводить до збільшення температури відхідних газів на виході з котла. Як свідчить рис. 2, температура розжарених газів змінюється немонотонно вздовж паливної через складну динаміку процесів горіння та теплопередачі. У ядрі факела температура сягає 1300°C , що відповідає активній зоні горіння. Біля фронтальної стіни поблизу пальника температура знижується до 1250°C , що свідчить про відведення теплоти топковими екранами і теплообміном між повітрям з об'єму паливної. На виході з топки температура газового потоку становить 1070°C , що вказує на зменшення тепловиділення після завершення основного процесу горіння. Зона займання і горіння газоповітряної суміші має температуру $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$.

Приведені на рис. 2 планки похибок свідчать, що відхилення розрахункових даних від експериментів [12] не перевищує 3 %, що дозволяє вважати використану математичну модель і вибрану для розрахунків модель турбулентності адекватними для діапазону режимних параметрів, що використаний в представленій роботі.

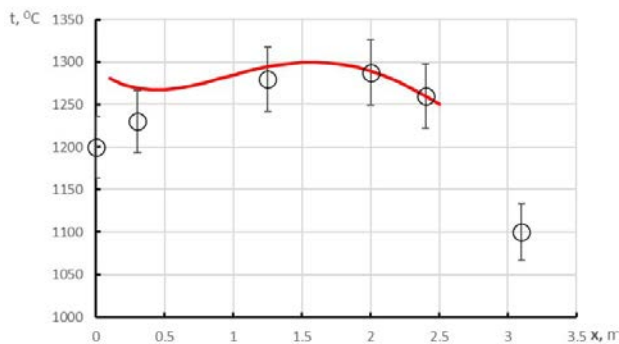


Рис. 2. Розподіл температур вздовж факела

Обговорення отриманих результатів. Згідно конструктивних особливостей котла ДКВР найбільш термонапруженими частинами в ньому є днище верхнього барабана і труби бічних екранів поблизу пальника. На рис. 3 представлено результати CFD-моделювання розподілу теплового потоку на стінках топки парового котла за різних рівнів теплового навантаження – 40 %, 60 %, 80 % та 100 % від номінального. Як свідчить рис. 3 на бічних стінках паливної утворюються «проекции» факела розжарених газів з пальника

внаслідок дії променевого теплового потоку площею $\approx 0,73\text{ м}^2$.

Підвищення теплового навантаження котла призводить до інтенсивнішого й менш рівномірного теплового впливу на обмурівку паливної. Ця інформація важлива для оцінки теплових напружень, вибору матеріалів і оптимізації режимів роботи котла, щоб запобігти локальному перегріву та зношуванню стінок. Масштаби кольорових шкал показують, що максимальні значення теплового потоку на стінках збільшуються від $\approx 2,1 \cdot 10^4\text{ Вт/м}^2$ при 40 % навантаження до понад $5,5 \cdot 10^4\text{ Вт/м}^2$ при 100 %. Це відповідає очікуваній інтенсифікації процесу горіння та більшій кількості тепла, що передається до водоохолоджуваних поверхонь. У всіх випадках зберігається характерна «плямиста» картина: окремі ділянки (переважно в районі факела й на протилежній стінці) мають суттєво більший тепловий потік, що вказує на локальну концентрацію полум'я та конвективно-радіаційного теплообміну. При збільшенні потужності від 40 % до 100 % не лише зростає пікове значення, а й збільшується площа стінок, на якій тепловий потік перевищує середній рівень.

На рис. 4 подано результати CFD-моделювання розподілу температури газового потоку всередині топки котла ДКВР-10-13 за різних режимів роботи. Аналіз рис. 4 свідчить, що зі збільшенням навантаження підвищується загальний рівень температур у топковому просторі, а зона максимальної температури розширюється й просувається глибше в об'єм камери згоряння.

Про процес змішування газоподібного палива з повітрям у паливковому пристрої та формування факела горіння в камері котла наглядно свідчить рис. 5. На ньому зображено поле розподілу частки паливно-повітряної суміші (Mixture Fraction) у паливковому вузлі котла, отримане за результатами CFD-моделювання. Основними елементами зображення є значення часток суміші (кольорова шкала (ліворуч) де значення «0» (області темно-синього кольору) – чисте повітря, без палива. Значення «1» (червоний колір) – практично чистий потік палива. Значення «0,1...0,9» – різні ступені змішування газоподібного палива з окисником. Лінії ізоліній – контури рівних значень суміші, що ілюструють процес дифузії й перемішування.

Рис. 5 свідчить, що безпосередньо біля виходу з пальника (червона/жовта зона) спостерігається висока концентрація палива. Далі по ходу потоку кольори змінюються на зелений і синій, що означає поступове змішування палива з повітрям та формування однорідної горючої суміші. Чітко

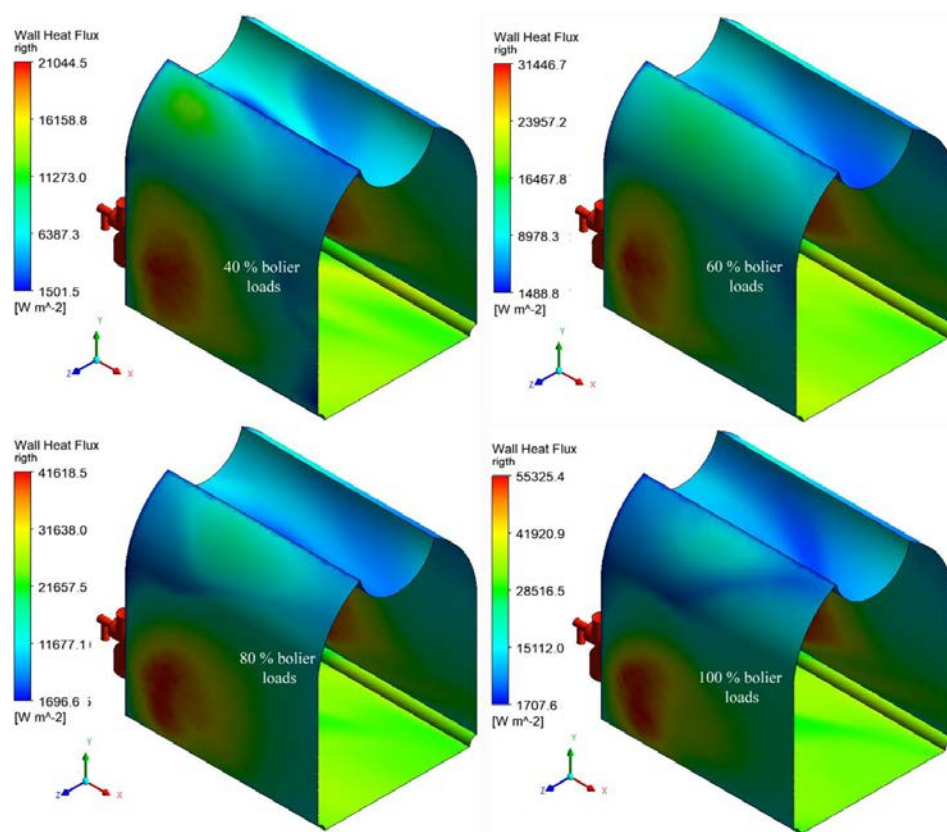


Рис. 3. Густина теплового потоку на стінках CFD-моделі паливні котла ДКВР 10-13

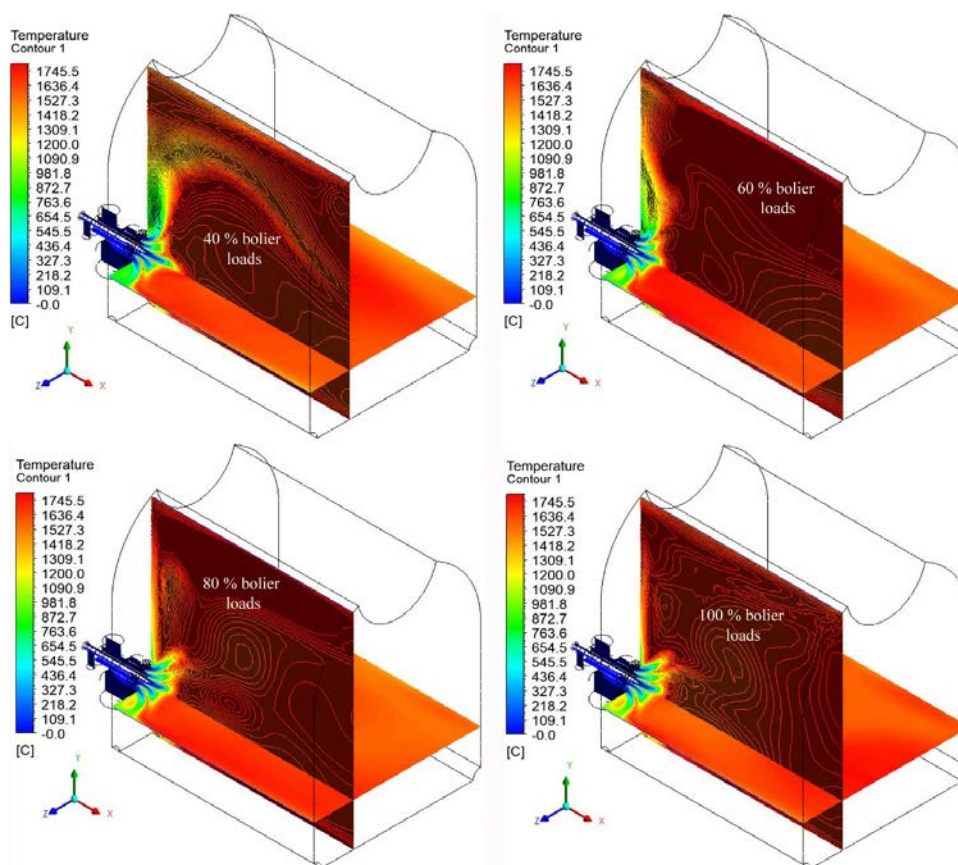


Рис. 4. Температура потоку в об'ємі паливні котла ДКВР 10-13

видно два факели (верхній і нижній), утворені палинковими струменями, які взаємодіють із навколишнім повітряним середовищем топки.

Візуалізація розподілу суміші є корисною для прогнозу утворення шкідливих викидів – надлишок палива (червоні області) може сприяти підвищенню CO , тоді як рівномірне змішування зменшує концентрацію NO_x . Тому наступним етапом моделювання стало визначення утворення оксидів азоту (NO_x) у просторі паливни котла при різних рівнях теплового навантаження – 40 %, 60 %, 80 % та 100 % від номінального.

Для обґрунтування доцільності заміни штатного паливника ГМГ-4 котла ДКВР-10-13 на паливник, що працює за струменево-нішевою технологією, на рис. 6 наведено результати CFD-моделювання утворення оксидів азоту (NO_x) у просторі паливни котла для обох варіантів конструкції паливників. Порівняння проводилось при номінальному режимі.

Спільним для обох конструкцій паливників є те, що високі концентрації (червоні/помаранчеві області) спостерігаються у верхній частині факела та поблизу вихідної ділянки топки – там, де тем-

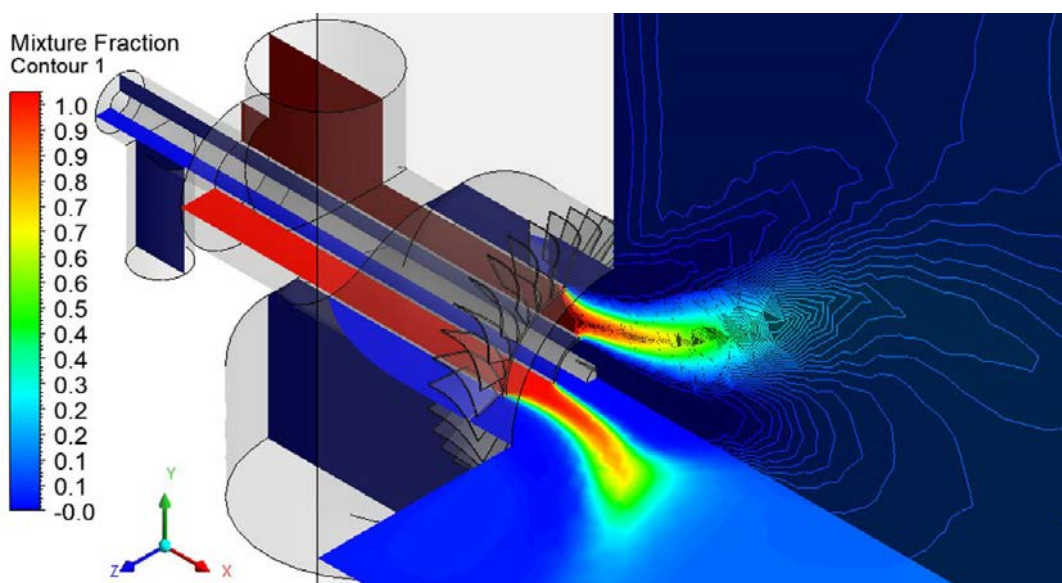


Рис. 5. Інтенсивність процесу перемішування (Mixture Fraction)

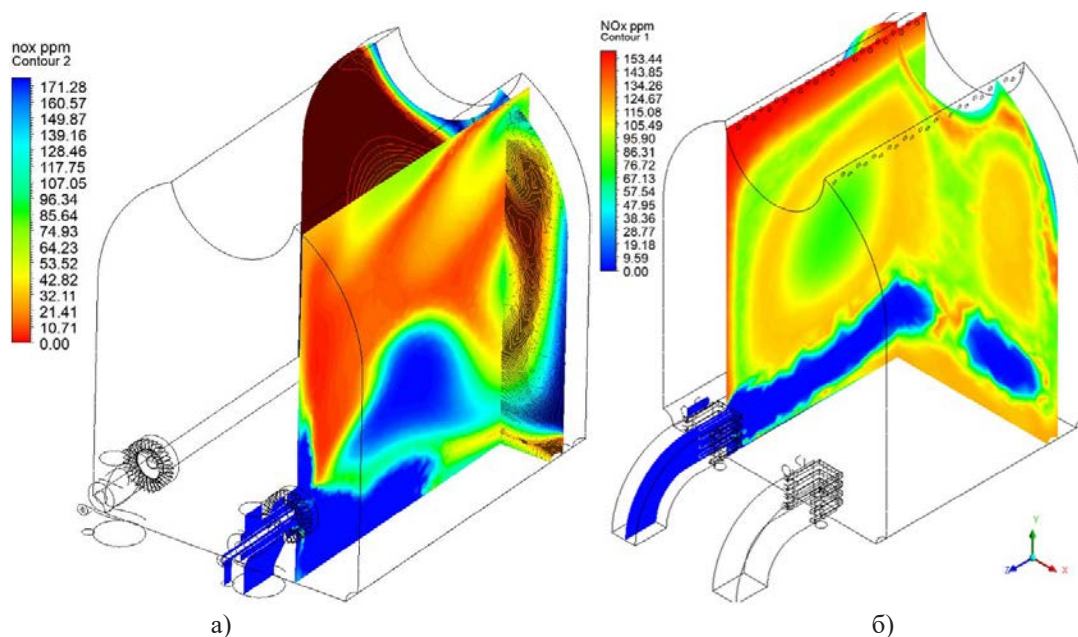


Рис. 6. Розподіл NO_x в характерних перерізах паливни при номінальному тепловому навантаженні котла у випадку використання паливників ГМГ-4 (а) та паливника, що побудований за струменево-нішевою технологією (б) [13]

пература газу максимальна і наявний надлишок кисню. Низькі концентрації (сині зони) переважають у зоні первинного горіння біля пальника та ближче до виходу димових газів, де температура і вміст кисню нижчі.

Найбільше NO_x утворюється у верхній частині факела та поблизу виходу продуктів згоряння, де поєднуються висока температура та надлишок кисню. У зоні біля пальника та в нижніх шарах топки концентрація значно менша через нижчу температуру та інтенсивне змішування газів.

Аналіз рис. 6 для обох конструкцій пальників свідчить, що утворення NO_x відбувається головним чином у гарячих ділянках факела (термічний механізм Зельдовича), де поєднуються висока температура й достатній вміст кисню. Це підтверджує вплив температурного поля та режиму подачі повітря на інтенсивність утворення оксидів азоту в котлі.

При чому, використання пальників ГМГ-4 (рис. 6а) призводить до того, що гарячі гази та продукти згоряння піднімаються вгору, створюючи стійку область підвищеної температури, що сприяє інтенсивному утворенню термічних оксидів азоту. Спостерігається значно більша площа зон із високими концентраціями NO_x (червоні та оранжеві ділянки) у верхній частині паливни. Концентрація NO_x у пікових зонах сягає понад 160 ppm.

В паливні котла ДКВР, що оснащений пальниками, що працюють за струменево-нішевою технологією зона підвищених концентрацій зсунута ближче до виходу паливни, що свідчить про іншу

аеродинаміку й більш м'який температурний режим. Поле концентрацій більш рівномірне, із переважанням зелених і жовтих відтінків, що вказує на ефективніше перемішування та нижчі локальні температурні піки. Максимальні концентрації NO_x трохи нижчі (до ~150 ppm) і займають менший об'єм.

Висновки:

– Розподіл теплового потоку на стінках топки водогрійного котла за різних навантажень (40 %, 60 %, 80 % і 100 %). З підвищенням навантаження спостерігається зростання щільності теплового потоку та розширення зон інтенсивного тепловідбору, що свідчить про збільшення теплової потужності процесу згоряння.

– Розподіл температури газового потоку в топці котла ДКВР-10-13 при різних навантаженнях (40 %, 60 %, 80 % та 100 %). Зі збільшенням навантаження спостерігається зростання середньої та пікової температур, а також розширення зони інтенсивного горіння.

– Головним механізмом формування NO_x є термічне утворення (механізм Зельдовича), інтенсивність якого визначається температурним полем і доступністю кисню в різних частинах паливни

– Пальник, що працює за струменево-нішевою технологією забезпечує зменшення утворення NO_x за рахунок кращого змішування палива з повітрям і зниження температур у зоні горіння.

– Використання такого пальника потенційно дозволяє знизити викиди оксидів азоту без погіршення стабільності процесу горіння, що є вагомою перевагою з екологічної точки зору.

Список літератури:

1. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Marasin O.V., Gurevich M.O., Lavrentsov E.M. Methods to reduce nox formation during gas combustion in boilers. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.06>
2. Peian Chong, Jianning Li, Xiaolei Zhu, Dengke Jing, Lei Deng. Numerical Study on Combustion Characteristics of a 600 MW Boiler Under Low-Load Conditions. *Processes*. 2024. 12(11). 2496. <https://doi.org/10.3390/pr12112496>
3. Kang-Min Kim, Gyu-Bo Kim, Byoung-Hwa Lee, Chung-Hwan Jeon and Joon-Ho Keum. Methane Gas Cofiring Effects on Combustion and NOx Emission in 550 MW Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler. *ACS Omega*. Vol 6.Issue 46. 2021. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04574>
4. Zhang D., Hai Zhang, Yuxin Wu, Mercury Zhang, Hong Kong and Junfu Lu. Experimental and Numerical Studies on Combustion Characteristics of a 600 MW Supercritical Arch-fired Boiler Equipped With Slot Burners Before and After Retrofit. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. 2017. 37(2). 606–613. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.160628>
5. Tianlong Wang, Chaoyang Wang, Zhiqiang Liu, Show Shuai Ma and Huibo Yan. Experiment Study and Industrial Application of Slotted Bluff-Body Burner Applied to Deep Peak Regulation. *International Journal of Information Technologies and Systems Approach*. 2024. 17(1). 1–15. <https://doi.org/10.4018/IJITSA.332411>
6. Kang-Min Kim, Seok-Gi Ahn, Gyu-Bo Kim, Chung Hwan Jeon. Development of Subair Technique for Combustibility Enhancement and NOx Reduction in a Pulverized Coal-Fired Boiler. *ACS Omega*. 2019. 4(1). 2291–2301 <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03405>
7. Eswara Kumar, Naveen Janjanam, M. Nagaraju, V. Diwakar, CFD analysis of combustion parameters of methane-airmixture. *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*. ISSN: 2278-0181 IJERTV4IS050217 www.ijert.org Vol. 4 Issue 05, May-2015.

8. Lucky Anetor, Edward Osakue, Christopher Odetunde, Reduced mechanism approach of modeling premixed propane-airmixture using ANSYS fluent. *Engineering Journal*. Vol. 16. Issue 1, ISSN 0125-8281. January 2012 <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.1.67>
9. Upendra Rajak, TikendraNath Verma (2017) Numerical investigation on cylindrical combustion chamber for methane-air fuel. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME)*. ISSN (Print): 2319-3182 Volume -6, Issue-1-2, 2017 pp. 148–150.
10. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide. New-York, USA: ANSYS Inc, 2012.
11. Компанія Струменево-Нишова Технологія. Назва з екрану. URL: <http://sn-technology.com/ua/> (дата звернення 22.12.2024).
12. Редько А. О., Давіденко А. В., Павловський С. В., Кулікова Н. В., Костюк В. Є., Кирилаш О. І. Моделювання процесів теплообміну в топках водотрубних котлів ДКВР-10/14. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2016. № 844. С. 180–187. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2016_844_28
13. Рачинський А. Ю. Баранюк О. В., Черноусенко О. Ю. Термонапружений стан барабану котла ДКВР-10-13 у разі заміни штатного пальника на струменево-нішевий. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2025. № 1(178). С. 137–144. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-137-144>

Rachynskiy A.Yu. MODELING OF THE INFLUENCE OF THERMAL LOAD ON THERMAL AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF THE DKVR-10-13 BOILER

The article presents the results of CFD-study of the process of natural gas combustion in the fuel chamber of the DKVR-10-13 steam boiler when varying the thermal load, assessing its thermal efficiency and impact on environmental indicators. The calculations were performed in the free student version of ANSYS Student. The aim of the work is to predict the formation of nitrogen oxides (NOx) in the DKVR-10-13 boiler at different thermal loads by means of CFD-modeling of combustion processes. The object of the study is the combustion processes of gaseous fuel and their impact on the boiler performance. The subject of the study is the CFD-model of the DKVR-10-13 boiler fuel chamber with standard burners capable of operating on liquid and gaseous fuel. The application of numerical modeling methods made it possible to analyze in detail the hydrodynamics and heat and mass transfer, assess the combustion efficiency and the impact on the level of harmful emissions. The model was verified on the basis of published and verified works of the Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. The deviation of the calculated data from the experimental results does not exceed 3%. Therefore, the applied mathematical model and the turbulence model selected for calculations are adequate for the range of operating parameters used in this study.

It was established that the standard burners of the DKVR-10-13 boiler do not meet the current standards for NOx emissions. It is proposed to replace them with jet burners from the SNT company, which, according to the modeling results, reduces the average NOx content at the outlet of the fuel chamber by approximately 20%. The effect is explained by the lower temperature in the active combustion zone ($\approx 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ versus $\approx 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ for standard burners).

It was determined that the jet-niche burner provides a reduction in NOx formation due to better mixing of fuel with air and a decrease in temperatures in the combustion zone. The use of such a burner potentially allows reducing nitrogen oxide emissions without worsening the stability of the combustion process, which is a significant advantage from an environmental point of view.

Key words: heat transfer, modeling, sintering, nitrogen oxides, torch.

Дата надходження статті: 02.11.2025

Дата прийняття статті: 18.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Усов І.Л.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Шелешей Т.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ: АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ ВИКИДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО МОДЕРНІЗАЦІЇ

Зростаюча екологічна загроза, спричинена викидами від теплових електростанцій, зумовлює необхідність пошуку рішень для зниження негативного впливу на довкілля. Теплова енергетика досі залишається одним із основних джерел забруднення повітря та викидів парникових газів.

Метою цього дослідження стало систематичне узагальнення наукових і технічних підходів до підвищення екологічної ефективності теплових електростанцій (ТЕС) на основі огляду понад 35 наукових публікацій із баз Scopus, Web of Science та вітчизняних видань і комп'ютерного моделювання викидів для 500-МВт вугільних котлоагрегатів. Проаналізовано шість ключових технологічних рішень. Впровадження систем рекуперації тепла й контактних теплообмінників підвищує тепловий коефіцієнт корисної дії (ККД) котлоагрегатів на 10–15 %, що забезпечує повторне використання вторинної енергії димових газів. Перехід на альтернативні види палива (біомасу, природний газ або їх комбінацію) дозволяє знизити викиди CO_2 , SO_2 і NO_x у середньому на 20–30 % порівняно з вугіллям. Очищення димових газів за допомогою SCR-систем, скрубєрів і електрофільтрів дає змогу зменшити концентрації NO_x , SO_2 і твердих частинок у діапазоні 70–99 % залежно від конфігурації обладнання. Використання когенераційних установок підвищує загальний ККД до 80 % та скорочує викиди CO_2 на 20–30 % у порівнянні зі стандартними технологіями, а автоматизація й цифрове керування процесами сприяють додатковому зниженню енергетичних витрат і забруднень до 30 %. Комплексна інтеграція цих підходів дозволяє досягти одночасного екологічного та економічного ефекту за умови підтримки з боку держави та наявності нормативної бази. Практична цінність роботи полягає у формуванні кількісних показників ефективності кожного рішення й розробці дорожньої карти модернізації українських ТЕС з урахуванням стандартів сталого розвитку.

Ключові слова: енергоефективність, димові гази, когенерація, технології спалювання палива, автоматизація процесів горіння, екологічні стандарти.

Постановка проблеми. Сучасна енергетика України перебуває на перехресті критичних змін, що зумовлено як внутрішніми економічними викликами, так і глобальними екологічними тенденціями. Зношеність енергетичної інфраструктури, залежність від викопних джерел енергії, а також зобов'язання щодо зниження викидів парникових газів формують необхідність трансформації технологій виробництва електроенергії. Особливої уваги потребують ТЕС, які залишаються основою енергетичного балансу України, але водночас є одними з найбільших джерел забруднення довкілля. Забезпечення екологічної безпеки та енергоефективності ТЕС є важливим

кроком у напрямку сталого розвитку, відповідності міжнародним зобов'язанням та досягнення енергетичної незалежності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вчений Ч. Добре (С. Dobre 2024) зазначав, що модернізація ТЕС у країнах Центральної та Східної Європи шляхом впровадження когенераційних систем дозволила знизити викиди парникових газів до 25 % у порівнянні з традиційними підходами до генерації енергії. У дослідженні Н. Фіалко, Р. Навродська (2021) обґрунтовано ефективність застосування технологій глибокої утилізації теплоти димових газів, що забезпечує підвищення (ККД) котлоагрегатів на 5–8 % та одночасне зниження викидів CO

та NO_x . Такі підходи мають особливе значення для українських ТЕС, де рівень зношеності обладнання є критичним.

Х. Крістінссон та С. Ланг (H. Kristinsson та S. Lang 2021) у своєму дослідженні, довели, що впровадження цифрових систем керування процесами горіння підвищує стабільність та гнучкість роботи енергетичних установок. Додаткову увагу до цифровізації процесів також приділили вчені Г. Цоумаліс та З. Бампос (G. Tsoumalis та Z. Vampros 2022), які показали, що використання автоматизованих систем дозволяє зменшити викиди забруднювальних речовин на 20–30% навіть без капітальної реконструкції.

На думку Чжоу та Янг (Zhou та Zhang 2023), одним із ключових напрямків виконання зобов'язань за Паризькою кліматичною угодою є впровадження когенераційних систем на основі біомаси та синтез-газу, що не лише зменшує викиди CO_2 , а й сприяє диверсифікації паливного балансу. У свою чергу, В. Езе та співавтори (V. Eze et al. 2024) довели, що використання малих когенераційних установок із інтелектуальними системами керування забезпечує досягнення ККД до 88% і водночас знижує витрати палива. Це особливо актуально для децентралізованих систем енергозабезпечення в умовах сучасних викликів.

Крім того, дослідження А. Замулко і Довгаль (A. Zamulko та M. Dovhal 2023) акцентує увагу на тому, що розвиток українських ТЕС має бути тісно пов'язаний із процесами євроінтеграції, які передбачають відповідність екологічним нормам ЄС. Автори підкреслюють, що лише за умов адаптації сучасних технологічних рішень до локальних умов можна досягти екологічної стійкості й енергетичної ефективності.

Таким чином, питання екологізації та підвищення енергоефективності ТЕС є комплексним і вимагає міждисциплінарного підходу, що охоплює модернізацію топкових систем, впровадження чистих технологій, використання альтернативного палива та автоматизоване керування процесами горіння. Мета дослідження – провести огляд сучасних підходів до підвищення екологічної ефективності ТЕС шляхом удосконалення обладнання та зниження шкідливих викидів.

У даному дослідженні застосовано комплексний підхід, який поєднує теоретичні, аналітичні методи для вивчення шляхів підвищення екологічної ефективності ТЕС в умовах України. Такий підхід дозволив забезпечити цілісне бачення проблеми і сформувати основу для практичної реалізації заходів з модернізації ТЕС.

Теоретичні методи включають системний аналіз наукових джерел і синтез існуючих підходів до зниження викидів

Аналітичний метод було використано для вивчення науково-технічної літератури, нормативно-правової бази та технічної документації, що стосується експлуатації котлоагрегатів. Також проведено аналіз наукових публікацій, зокрема Карпенко та ін. (2022), Саїдур та ін (2020), Чжоу та Янг (Zhou & Zhang 2023), які надали теоретичну основу для порівняння різних технологій підвищення енергоефективності.

Порівняльний метод було застосовано для аналізу ефективності технічних рішень у сфері рекуперації теплоти димових газів Фіалко та ін. (2021), когенераційних технологій Дрождж та ін. (Drożdż et al., 2024), систем очищення викидів Г. Цоумаліс (G. Tsoumalis et al., 2022) і заміщення традиційного палива біомасою Езе та ін. (Eze et al., 2024).

Фактичну базу дослідження склали технічні характеристики обладнання, зокрема котлоагрегатів Siemens, Viessmann та Bosch Industrial. Було проаналізовано інформацію, оприлюднену на офіційних сайтах компаній. Наприклад, детальні технічні рішення для промислових котлів були розглянуті на базі публікацій Siemens AG (n.d.).

Частину розрахункових підходів було адаптовано з міжнародних досліджень, щоб забезпечити відповідність результатів загальносвітовим стандартам. Застосовані методи також дозволяють здійснити повторюваність дослідження за умов наявності аналогічних початкових технічних даних. Таким чином, дослідження ґрунтується на поєднанні нормативної бази, наукових джерел, сучасних технологій, а також використанні офіційних статистичних та технічних ресурсів.

Постановка завдання. Метою статті є комплексний аналіз сучасних технологій очищення викидів теплових електростанцій та підходів до модернізації їх енергетичного обладнання з позицій підвищення екологічної ефективності й енергоефективності. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні завдання:

- проаналізувати сучасний стан викидів шкідливих речовин від енергоблоків ТЕС та чинні екологічні вимоги до їх обмеження;

- узагальнити та систематизувати наукові підходи й технології очищення димових газів від оксидів азоту, сірки, твердих частинок та вуглекислого газу;

- оцінити потенціал когенераційних технологій, схем рекуперації тепла та паливної диверси-

фікації щодо зменшення негативного впливу ТЕС на довкілля;

- проаналізувати роль цифровізації та автоматизованих систем керування топковими процесами у підвищенні екологічної ефективності роботи ТЕС;

- сформулювати узагальнені рекомендації щодо пріоритетних напрямів модернізації українських теплових електростанцій з урахуванням вимог сталого розвитку та міжнародних екологічних стандартів.

Виклад основного матеріалу. Енергетичний сектор України станом на 2024 рік перебуває у процесі глибокої трансформації під впливом геополітичних ризиків, економічних викликів та екологічних обмежень. Основними проблемами залишаються зношеність інфраструктури, залежність від викопного палива та імпортованого газу, а також низький рівень енергоефективності. Більшість українських ТЕС була побудована у 1960–1980-х роках, і нині працюють понад проєктний термін експлуатації, що призводить до підвищених витрат палива, зростання викидів і зниження ефективності Карпенко та ін. (Karpenko et al.), 2022; Замулко та Довгань (Zamulko & Dovhal, 2023).

Водночас, Україна зобов'язалася виконувати міжнародні кліматичні цілі, зокрема скорочення викидів парникових газів відповідно до Паризької кліматичної угоди. Проте фактична реалізація цих зобов'язань ускладнена через технологічну відсталість багатьох ТЕС та низький рівень впровадження сучасних енергоощадних технологій Міністерство енергетики України, 2023; Кабейі та Оланреважу (Kabeyi & Olanrewaju, 2022).

У відповідь на ці виклики в науковому середовищі розглядаються варіанти підвищення ефективності ТЕС за рахунок модернізації обладнання, переходу до комбінованого виробництва тепла та електроенергії, а також впровадження більш ефективних схем управління теплом Сосновський та Онацький (Sosnovskyi & Onatskyi, 2022).

Україна задекларувала зобов'язання в рамках Паризької кліматичної угоди щодо скорочення викидів CO₂ (UNFCCC, 2015). У 2021 році Україна подала оновлений Національно визначений внесок (NDC) до Секретаріату РКЗК ООН. У ньому Україна зобов'язується скоротити викиди парникових газів на 65% до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року. Цей документ є офіційним підтвердженням зобов'язань України в рамках Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України 2021. Однак виконання цих зобов'язань ускладнене через технологічну відсталість ТЕС і недостатній

рівень впровадження відновлювальних джерел Кабейі та Оланреважу (Kabeyi & Olanrewaju, 2022); Чжоу та Янг (Zhou & Zhang, 2023).

Згідно з дослідженням Фіалко та ін. (Fialko et al. 2021), понад 70% обладнання на об'єктах ТЕС перебуває у зношеному стані, що не відповідає сучасним критеріям ефективності та екологічної безпеки. У свою чергу, Фарагіл та ін. (Farghali et al. 2023) підкреслюють необхідність впровадження стратегій енергозбереження як ключового елементу подолання енергетичної кризи й підвищення стійкості систем. Як додають Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś i Buketov 2024), розбудова інноваційних когенераційних систем із низьким рівнем викидів є дієвим інструментом зменшення енергетичної залежності та екологічного навантаження.

Як зазначають Замулко і Довгань (Zamulko i Dovhal 2023), розвиток ТЕС в умовах європейської інтеграції потребує пріоритетної уваги до екологічної безпеки та відповідності нормам ЄС. Водночас, як наголошує Оланреважу (Olanrewaju 2022), енергетична реформа має враховувати й соціальні наслідки – від енергетичної бідності до потреби у перекваліфікації кадрів, особливо у вугільних регіонах. Таким чином, виклики теплоенергетики вимагають комплексного підходу до реформування: від оновлення інфраструктури й впровадження новітніх технологій до реалізації політики сталого розвитку, залучення інвестицій і забезпечення відповідності міжнародним зобов'язанням.

Поглиблюючи аналіз, варто детально розглянути екологічні наслідки функціонування ТЕС як одного з ключових джерел забруднення довкілля в Україні. Теплові електростанції залишаються одним з основних джерел шкідливих викидів в атмосферу, спричиняючи багатовекторний екологічний вплив – від локального забруднення повітря до глобальних кліматичних змін. Ці речовини є каталізаторами кислотних дощів, смогу, деградації ґрунтів, а також чинниками зростання онкологічних та респіраторних захворювань серед населення.

Як вказано в роботі Риндюк та ін (2020), використання мазуту з високим вмістом сірки призводить до суттєвого зростання викидів SO₂, які не завжди повною мірою вилучаються фільтраційними системами, особливо на застарілих енергоблоках. Дослідження Лі та Лі (Lee & Lee 2021) також демонструє, що традиційні методи спалювання палива, характерні для більшості ТЕС у країнах Східної Європи, мають обмежені можливості щодо скоро-

чення емісій навіть за умови оптимізації процесів горіння. У роботі Кабейї та Оланреважу (Kabeyi & Olanrewaju 2022) наголошується, що вплив ТЕС на навколишнє середовище не обмежується атмосферними викидами, а охоплює також тепловинамічні втрати, забруднення водних ресурсів і утворення золи та шлаку, які потребують спеціального поводження. А у статті Фаргалі та ін (Farghali et al. 2023) акцент зроблено на загрозах, пов'язаних із техногенними аваріями й нестійкістю систем очищення – це зумовлює необхідність впровадження принципів багаторівневої екологічної безпеки.

Система охолодження, що широко застосовується на ТЕС, створює додаткові навантаження на водні екосистеми, зумовлюючи термічне забруднення. Як зазначають Чжоу та Ян (Zhou & Zhang 2023), ТЕС, що працюють на вугіллі, мають один із найвищих рівнів екологічного навантаження протягом усього життєвого циклу: від видобутку палива до утилізації відходів. Це підтверджується результатами аналізу життєвого циклу (LCA, Life Cycle Assessment), які виявляють приховані й прямі втрати у всіх фазах функціонування ТЕС. Таким чином, вплив ТЕС на довкілля є системним і багатфакторним. Він охоплює не лише прямі викиди, а й вторинні екологічні ефекти, що вимагає комплексного підходу: модернізації обладнання, використання чистіших видів палива, впровадження багаторівневого моніторингу та повної оцінки впливу на навколишнє середовище у рамках життєвого циклу виробництва енергії.

Однією з ключових передумов зниження викидів і підвищення екологічної ефективності ТЕС є покращення показників енергоефективності, що безпосередньо пов'язані зі станом обладнання та впровадженням сучасних технологій. Низька енергоефективність є однією з найбільш хронічних проблем теплової енергетики України. Подібні проблеми описано у дослідженні Ялова та Бондар (2021), де показано, що шлакування та забруднення поверхонь нагріву суттєво знижують теплову ефективність котлів і впливають на їх надійність. Більшість ТЕС функціонує на обладнанні, яке вже давно перевищило нормативні строки експлуатації, що зумовлює високі втрати тепла та суттєве зниження ККД. У дослідженні Сосновського Ю.М та Онацького А.І. (Sosnovskiy, Y. M., & Onatskiy, A. I. 2022) зазначають, що ККД багатьох котлів не перевищує 35%, а втрати на транспортування пари та гарячої води сягають 20–30%. Це призводить до надмірного використання палива, підвищення собівартості електроенергії й тарифного тиску на споживачів.

Як зазначають Дзікуц та ін. (Dzikuć et al. 2020), оптимізація режимів горіння вугільного палива дозволяє зменшити втрати тепла та скоротити викиди без повної реконструкції обладнання. Вчений оланреважу (Olanrewaju 2022) наголошує, що модернізація ТЕС має базуватись на впровадженні цифрових систем контролю та оптимізації, що дозволяє значно зменшити непродуктивні витрати енергії. У статті Саїдур та ін (Saidur et al. 2012) акцентовано увагу на необхідності експертичного аналізу як ключового інструменту оцінки втрат і виявлення найбільш неефективних процесів у циклі виробництва електроенергії. Такий підхід забезпечує стратегічне планування енергомодернізації з урахуванням ресурсної та екологічної ефективності.

Згідно з дослідженням Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś i Buketov 2024), впровадження когенераційних систем – одне з найбільш ефективних рішень. Поєднання виробництва електричної та теплової енергії в одному циклі дозволяє підвищити загальний ККД до 75–80% і водночас зменшити викиди CO₂ на 20–30% порівняно з традиційними схемами генерації. Крім того, когенерація забезпечує більшу гнучкість системи, що особливо важливо в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії. Як вказано в роботі Кабейї та Оланреважу (Kabeyi & Olanrewaju 2022), подальше зволікання з модернізацією не лише шкодить екологічним показникам, а й знижує стійкість енергосистеми в умовах змінного попиту. Автоматизація подачі палива, інтеграція цифрових сенсорів та адаптивне керування параметрами горіння здатні забезпечити більш ефективне використання палива та зниження викидів без необхідності повної реконструкції ТЕС (Цоумаліс та ін. (Tsoumalis et al.), 2022).

Таким чином, підвищення енергоефективності ТЕС є комплексною задачею, яка охоплює технічні, економічні та екологічні аспекти. Її реалізація передбачає системне впровадження цифрових рішень, когенераційних технологій, експертичного аналізу та гнучких стратегій управління паливними потоками.

Ефективне реагування на зазначені виклики потребує впровадження інноваційних технологій, які здатні не лише покращити технічні характеристики ТЕС, а й зменшити їх екологічне навантаження. Модернізація ТЕС є одним із ключових напрямів забезпечення енергетичної безпеки, економічної доцільності та екологічної стійкості України. У роботі Ісмайільзада та ін. (Ismayilzada et al. 2024) акцентовано увагу на сучасних технічних

засобах для генерації теплової енергії, її конверсії та керування потоками, що узгоджується з вектором модернізації, спрямованим на підвищення енергоефективності та зменшення екологічного навантаження. Вона передбачає впровадження сучасних технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності, зниження шкідливих викидів та оптимізацію експлуатаційних процесів. Як зазначає Фіалко та ін. (Fialko et al. 2021), системи рекуперації тепла дозволяють повторно використовувати вторинну енергію димових газів, підвищуючи ККД котлів на 10–15% та зменшуючи витрати палива. Було проаналізовано результати практичної реалізації утилізаторів теплоти димових газів на вітчизняних ТЕС (наприклад, Домбровська Т.М. 2021), що підтвердило ефективність таких заходів для зниження питомих витрат палива та зменшення викидів CO₂.

Цифровізація процесів горіння і дистанційне керування параметрами роботи ТЕС стають важливим фактором зниження втрат і викидів. У статті Цоумаліс та ін. (Tsoumalis et al. 2022) підкреслено, що використання інтелектуальних систем управління дозволяє оптимізувати процес спалювання навіть без капітальної реконструкції, забезпечуючи скорочення викидів на 20–30%. Як вказано в роботі Оланреважу (Olanrewaju 2022), цифрові системи контролю сприяють стабільній роботі обладнання, зменшують вплив людського фактора та підвищують оперативність прийняття рішень.

Особливу увагу заслуговують когенераційні установки з комбінованим виробництвом тепла та електроенергії. Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś i Buketov 2024) зазначають, що ККД таких систем може досягати 80%, а рівень викидів CO₂ зменшується на 20–25% у порівнянні з традиційною генерацією. Також підтверджено ефективність застосування когенерації на об'єктах централізованого теплопостачання, особливо у промислових районах.

Згідно з дослідженням Фаргалі та ін. (Farghali et al. 2023), інноваційний підхід до модернізації ТЕС передбачає інтеграцію стратегічного енергоменеджменту: прогнозування навантажень, адаптивного керування паливними потоками та динамічної оптимізації роботи установок у режимі реального часу. Як підкреслюють Кабей та Оланреважу (Kabeyi та Olanrewaju 2022), сучасна модернізація ТЕС має бути багаторівневою – від технічного вдосконалення та впровадження низькотемпературних пальників до сертифікації за екологічними стандартами та запровадження LCA-оцінювання життєвого циклу об'єкта.

Таким чином, інноваційні технології модернізації ТЕС охоплюють не лише окремі технічні рішення, а й системні трансформації управлінських, екологічних та енергетичних процесів. Їх широке впровадження є необхідною умовою для досягнення цілей сталого розвитку, декарбонізації та зменшення залежності від імпорتنих енергоресурсів. Одним із логічних напрямів модернізації ТЕС, тісно пов'язаним із підвищенням енергоефективності, є скорочення шкідливих викидів, яке має вирішальне значення для екологічної безпеки.

Однією з ключових екологічних проблем, пов'язаних із роботою ТЕС, є високий рівень викидів забруднювальних речовин: оксидів азоту (NO_x), сірки (SO₂), зважених твердих частинок (PM₁₀, PM_{2.5}) та вуглекислого газу (CO₂). Зменшення цих викидів є передумовою наближення до європейських екологічних стандартів і забезпечення екологічної безпеки в промислових регіонах України. Згідно з Фаргалі та ін. (Farghali et al. 2023), інтеграція новітніх інженерних рішень дає змогу зменшити викиди забруднювальних речовин на 20–40% навіть за умов часткової модернізації.

Оксиди азоту (NO_x) утворюються під час високотемпературного горіння, спричиняючи утворення кислотних дощів і фотохімічного смогу. Як зазначено у роботі Крістінссон і Ланг (Kristinsson i Lang 2021), точне регулювання подачі палива й повітря у котлах дозволяє знизити емісію NO_x на 50–60%. Для досягнення вищого ступеня очищення використовуються технології селективного каталітичного відновлення (SCR) та селективного некаталітичного відновлення (SNCR), ефективність яких може перевищувати 90% (Цоумаліс та ін. (Tsoumalis et al.), 2022).

Щодо оксидів сірки (SO₂), то сірчисті сполуки утворюються при спалюванні мазуту та вугілля. Згідно з дослідженням Сінгх і Шукла (Singh i Shukla 2014), для зменшення викидів SO₂ найефективнішими є вологі та напівсухі скрубєрні системи, які працюють на вапнякових або магнієвих абсорбентах. Такі технології забезпечують скорочення викидів на 70–95% за умов правильного проєктування та обслуговування та підтверджується, що навіть часткова модернізація існуючих систем очищення дозволяє суттєво зменшити концентрацію SO₂ у викидах.

Тверді частинки (PM). Викиди дрібнодисперсного пилу (PM₁₀, PM_{2.5}) є серйозним фактором ризику для здоров'я населення. Фіалко та ін. (Fialko et al. 2021) підкреслюють ефективність електростатичних фільтрів (ESP), які здатні видаляти до 99% зважених частинок. Альтернативою

є тканинні фільтри (рукавні), рекомендовані для котелень на твердому паливі, які демонструють аналогічну ефективність (Буковська та ін. (Bukowska et al.), 2017).

Вуглекислий газ (CO_2) залишається одним із ключових факторів кліматичних змін. Ефективними стратегіями зменшення його викидів є підвищення ККД обладнання, перехід на альтернативні види палива, зокрема біомасу, а також впровадження когенераційних технологій. Згідно з дослідженням Кабейі і Оланреважу (Kabeyi i Olanrewaju 2022), скорочення викидів CO_2 може бути досягнуте за рахунок модернізації систем теплопостачання та переходу до низьковуглецевої генерації. Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś i Buketov 2024) вказують, що поєднання виробництва тепла й електроенергії в межах когенераційного циклу дозволяє зменшити викиди CO_2 на 20–30% порівняно з традиційними технологіями. Додатково, Саїдур та ін. (Saidur et al. 2012) підкреслюють, що ексергетичний аналіз допомагає виявити основні джерела енергетичних втрат, оптимізуючи споживання палива та знижуючи вуглецевий слід.

Як зазначають Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś i Buketov 2024), найефективнішим рішенням є поєднання когенераційних технологій із сучасними системами очищення – це дозволяє зменшити викиди NO_x , SO_2 та CO_2 на 30–50% та підвищити загальний ККД до 80%. Оланреважу (Olanrewaju 2022) наголошує, що зниження викидів має розглядатися через призму життєвого циклу (LCA): від видобутку палива до утилізації шлаку та золи. Такий підхід дозволяє виявити приховані втрати й оцінити екологічні наслідки кожного етапу енергогенерації. Фаргалі та ін. (Farghali et al. 2023) підкреслюють роль автоматизованих систем екологічного моніторингу, які забезпечують адаптивне

керування процесами горіння та прогнозування екологічних навантажень.

Таким чином, зниження викидів шкідливих речовин на ТЕС вимагає комплексної стратегії, яка об'єднує модернізацію обладнання, трансформацію палива, цифровізацію управління і запровадження систем моніторингу життєвого циклу. Лише такий багаторівневий підхід дозволяє досягти реального покращення якості довкілля та відповідності міжнародним стандартам.

На основі проведеного літературного аналізу та систематизації сучасних підходів до підвищення екологічної ефективності ТЕС визначено ключові технологічні рішення, які вже продемонстрували свою результативність і можуть бути адаптовані в енергетичному секторі України (табл. 1).

Аналіз сучасного стану ТЕС в Україні виявив критичні проблеми: зношеність обладнання, високе екологічне навантаження та недостатній рівень впровадження інновацій. Встановлено, що ключовими напрямками підвищення екологічної ефективності є: рекуперація тепла, використання альтернативного палива, впровадження когенераційних технологій, очищення викидів (SO_2 , NO_x , PM) та цифрове управління процесами горіння. Результати досліджень підтверджують ефективність комплексного підходу, який дозволяє підвищити ККД установок до 80% та знизити викиди на 20–50%. Така модернізація повинна супроводжуватись державною підтримкою, оновленням нормативної бази та впровадженням оцінки життєвого циклу для забезпечення сталості енергетичної системи.

Висновки. Проведений огляд підтвердив, що підвищення екологічної ефективності теплової енергетики є багатокомпонентним завданням, що вимагає поєднання технічних інновацій, зміни паливної політики та вдосконалення управлін-

Таблиця 1

Основні технологічні рішення для підвищення екологічної ефективності ТЕС

Технологічне рішення	Підвищення ефективності
Рекуперація тепла та теплообмінні системи	Застосування систем рекуперації тепла дозволяє підвищити ефективність котлоагрегатів на 10–15% завдяки повторному використанню вторинної енергії димових газів
Альтернативні види палива	Зменшення викидів CO_2 , SO_2 і NO_x завдяки переходу на біомасу або природний газ замість вугілля.
Очищення димових газів	Зниження концентрацій забруднювачів (NO_x , SO_2 , тверді частинки) до 70–99% за допомогою SCR, скрубєрів, електрофільтрів.
Когенераційні установки	Збільшення ККД до 80%; зменшення викидів CO_2 на 20–30% порівняно з традиційними системами.
Автоматизація та цифровізація	Зменшення втрат енергії та обсягів викидів до 30% через застосування сенсорних систем, прогнозування, дистанційного керування.
Інтеграція технологій (комплексний підхід)	Однотиме досягнення екологічного та економічного ефекту; ефективна модернізація можлива за умов підтримки з боку держави та оновлення нормативної бази.

Джерело: сформовано авторами

ських рішень. Аналіз сучасних технологічних підходів свідчить про ефективність використання теплообмінного обладнання та систем рекуперації тепла для зменшення витрат палива. Перехід до менш вуглецевоємних джерел енергії, таких як біомаса та природний газ, забезпечує скорочення парникових викидів, а впровадження когенераційних установок дозволяє підвищити загальну енергетичну ефективність. Технології очищення димових газів – зокрема електрофільтри, скрубери та селективні каталітичні редуктори – значно зменшують викиди шкідливих речовин, а цифровізація процесів управління сприяє стабілізації роботи обладнання та зменшенню втрат енергії.

Разом із тим огляд показує, що для досягнення значущого екологічного ефекту недостатньо впроваджувати окремі технології у відриві від ширшого контексту. Необхідне формування цілісної стратегії модернізації галузі, яка включає адаптацію нормативної бази, стимулювання інвестицій та міждисциплінарну координацію.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою адаптивних моделей впровадження сучасних технологій на підприємствах різного масштабу, оцінкою їх життєвого циклу, а також формуванням критеріїв економічної доцільності у процесі екологічної трансформації теплової енергетики.

Список літератури:

1. Bukowska M., Nowak K., Proszak-Miączek D., Rabczak S. Concept of heat recovery from exhaust gases. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 245, № 5. 052057. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052057>
2. Cherednichenko O., Havrysh V., Shebanin V., Kalinichenko A., Mentel G., Nakonieczny J. Local green power supply plants based on alcohol regenerative gas turbines: economic and environmental aspects. *Energies*. 2020. Vol. 13, № 9. 2156. <https://doi.org/10.3390/en13092156>
3. Dobre C., Costin M., Constantin M. A review of available solutions for implementation of small–medium combined heat and power (CHP) systems. *Inventions*. 2024. Vol. 9, № 4. 82. <https://doi.org/10.3390/inventions9040082>
4. Drożdż M., Toś P., Buketov, V. Aspects of developing an innovative, energy-efficient, low-emission co-generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. № 5. С. 71–78. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/071>
5. Dzikuć M., Kuryło P., Dudziak R., Szufa S., Dzikuć M., Godzisz K. Selected aspects of combustion optimization of coal in power plants. *Energies*. 2020. Vol. 13, № 9. 2208. <https://doi.org/10.3390/en13092208>
6. Eze V. H. U., Tamball J. S., Uzoma O. F., Sarah I., Robert O., Okafor W. O. Advancements in energy efficiency technologies for thermal systems: a comprehensive review. *INOSR Applied Sciences*. 2024. Vol. 12, № 1. P. 1–20. <https://doi.org/10.59298/INOSRAS/2024/1.1.1010>
7. Farghali M., Osman A. I., Mohamed I. M. A., Rooney D. W., Ahmed A. I. Strategies to save energy in the context of the energy crisis. *Energy Efficiency*. 2023. Vol. 16. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01591-5>
8. Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Stepanova A.I. Improvement of environmental conditions by applying heat recovery technologies of boiler plants. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 6. P. 148–157. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/148>
9. Ismayilzada M., Abbasova S., Novruzova U., Safarova T. Study of technical means for heat generation, its application, flow control, and conversion of other types of energy into thermal energy. *Energy Harvesting and Systems*. 2024. Vol. 11. Article 20230125. <https://doi.org/10.1515/ehs-2023-0125>
10. Kabeyi M. J. B., Olanrewaju O. A. Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 9. Article 743114. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>
11. Карпенко І. М., Нікітін Є. Є., Басок Б. І. та ін. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні. У двох книгах. Книга 2. Київ : Наукова думка. 2022.
12. Kristinsson H., Lang S. Boiler control: improving efficiency of boiler systems: master's thesis. Lund: Lund University, Faculty of Engineering, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation. 2011. URL: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/3632662>
13. Lee H., Lee M.-J. Recent advances in ammonia combustion technology. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 18. 5604. <https://doi.org/10.3390/en14185604>
14. Ministry of Energy of Ukraine. Report on the implementation status of the National Emissions Reduction Plan for large combustion plants in 2023. 2023. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/Rozmishhennya-Zvit-po-vykonannyyu-NPD-za-2023.pdf>
15. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Updated nationally determined contribution of Ukraine to the Paris Agreement. 2021. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Ukraine%20NDC_July%2031.pdf
16. Домбровська Т.М. Theoretical and methodological principles of the paradigm of sustainable development: energy component. *Black Sea Economic Studies*. 2021. Issue 72-1. DOI: 10.32843/bses.72-3. URL (PDF): https://bses.in.ua/journals/2021/72_1_2021/5.pdf

17. Риндюк Д. В., Шелешей Т. В., Беднарська І. С., Беднарська Я. С. Оцінка впливу марки мазуту на викиди сірчистого ангідриду на енергетичних об'єктах. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Т. 31 (70), С. 231–236. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/36>
18. Saidur R., Mekhilef S., BoroumandJazi G., Mohammed H. A. A review on exergy analysis of biomass based fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, Iss. 2. P. 1217–1222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.076>
19. Siemens AG. Boiler solutions. N.d. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/buildings/hvac/oem/boiler-solutions.html>
20. Сосновський Ю. М., Онацький А. І. Enhancing the efficiency of heat and power production in district heating systems based on thermal power plants. *Energy: Technology, Economics, Ecology*. 2022. № 1. С. 43–52.
21. Викиди забруднювальних речовин в атмосферу від енергетичних установок. *Методика визначення*. ГКД 34.02.305-2002. Київ : ОЕП «ГРІФРЕ». URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/vikidi_zabrudnyvalnikh_rechovin-3-27842.pdf
22. Tsoumalis G. I., Bamos Z. N., Chatzis G. V., Biskas P. N. Overview of Natural Gas Boiler Optimization Technologies and Potential Applications on Gas Load Balancing Services. *Energies*. 15(22), 8461. <https://doi.org/10.3390/en15228461>
23. United Nations Framework Convention on Climate Change. Ukraine deposits instrument of ratification of Paris Agreement. 2016. URL: <https://unfccc.int/news/ukraine-deposits-instrument-of-ratification-of-paris-agreement>
24. Varlamov G. B., Romanova K. A., Nazarova I., Daschenko O., Kapustiansky A. Improvement of energy efficiency and environmental safety of thermal energy through the implementation of contact energy exchange processes. *Archives of Thermodynamics*. 2017. Vol. 38, No. 4. P. 127–137. <https://doi.org/10.1515/aoter-2017-0028>
25. Singh R., Shukla A. A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29. P. 854–864. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.005>
26. Ялова А.М., Бондар Н. В. Вплив шлакування та забруднення поверхонь нагріву на надійність роботи твердопаливних котлів на тес. Вісник Криворізького національного університету. 2021. Т. 19 (2). С. 151–157. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-53-151-157>
27. Замулко А. І., Довгаль М. О. Аналіз перспектив розвитку ТЕС в умовах інтеграції в європейський простір: монографія. Київ : Політехніка. 2023.
28. Zhou Y., Zhang L., Li H. On the evaluation of the “coal-to-gas”: A life cycle cost analysis. *Energy for Sustainable Development*. 2023. Vol. 73. P. 116–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.01.009>
29. Beztsennyi I. V., Bondzyk D. L., Shchudlo T. S., Dunayevska N. I. Obtaining kinetic characteristics of combustion of the coke from solid biofuels. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. №. 6. P. 15–20. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/015>

Usov I.L., Sheleshey T.V. IMPROVING THE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF THERMAL POWER PLANTS: ANALYSIS OF EMISSION TREATMENT TECHNOLOGIES AND MODERNISATION APPROACHES

The growing environmental threat caused by emissions from thermal power plants necessitates the search for solutions to reduce their negative impact on the environment. Thermal power generation remains one of the main sources of air pollution and greenhouse gas emissions.

The aim of this study was to systematically summarize scientific and technical approaches to improving the environmental efficiency of thermal power plants (TPPs) based on a review of more than 35 scientific publications from Scopus, Web of Science, and domestic publications, as well as computer modeling of emissions for 500 MW coal-fired boilers. Six key technological solutions were analyzed. The introduction of heat recovery systems and contact heat exchangers increases the thermal efficiency of boiler units by 10–15%, which ensures the reuse of secondary energy from flue gases. The transition to alternative fuels (biomass, natural gas, or a combination thereof) reduces CO₂, SO₂, and NO_x emissions by an average of 20–30% compared to coal. Flue gas cleaning using SCR systems, scrubbers, and electrostatic precipitators can reduce NO_x, SO₂, and particulate matter concentrations by 70–99%, depending on the equipment configuration. The use of cogeneration plants increases overall efficiency to 80% and reduces CO₂ emissions by 20–30% compared to standard technologies, while automation and digital process control contribute to an additional reduction in energy costs and pollution of up to 30%. The comprehensive integration of these approaches allows for simultaneous environmental and economic benefits, provided that there is support from the state and a regulatory framework in place. The practical value of this work lies in the formation of quantitative indicators of the effectiveness of each solution and the development of a roadmap for the modernisation of Ukrainian thermal power plants, taking into account sustainable development standards.

Key words: energy efficiency, flue gases, cogeneration, fuel combustion technologies, combustion process automation, environmental standards.

Дата надходження статті: 30.11.2025

Дата прийняття статті: 18.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 621.577.4:697.342:727.4
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/21>

Форись С.М.

Український державний університет науки і технологій

Усенко А.Ю.

Український державний університет науки і технологій

Шемет Т.М.

Український державний університет науки і технологій

ГЕОТЕРМАЛЬНІ ТЕПЛОВІ НАСОСИ З БАГАТОКОНТУРНИМИ ГРУНТОВИМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ КАМПУСІВ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю трансформації кампусних інфраструктур до низьковуглецевих, автономних та високоефективних систем теплопостачання, у яких використання геотермальних теплових насосів з багатоконтурними ґрунтовими полями розглядається як одне з найперспективніших рішень. З огляду на високу сезонну та добову мінливість теплових навантажень сучасних кампусів і значну неоднорідність геологічних умов виникає потреба у науковому обґрунтуванні оптимальних параметрів проєктування та експлуатації таких систем.

Мета статті полягає у науковому обґрунтуванні інженерних принципів проєктування та раціональних режимів експлуатації геотермальних теплових насосів із багатоконтурними ґрунтовими полями з урахуванням теплофізичних властивостей ґрунту, динаміки теплового навантаження кампусу та вимог енергоефективності.

Методи дослідження включають системний аналіз теплофізичних параметрів ґрунтових масивів, моделювання довготривалої динаміки температурних полів, структурно-технологічний аналіз роботи теплових насосів у змінних режимах та оцінювання техніко-експлуатаційних умов інтеграції геотермальних установок у теплові мережі кампусу. Застосовано аналітичне порівняння конфігурацій багатоконтурних полів і параметрів їх взаємодії з тепловими насосами, а також проведено аналіз світової практики функціонування подібних систем.

У результаті проведеного дослідження встановлено закономірності формування та еволюції температурного поля багатоконтурних ґрунтових масивів, доведено визначальну роль теплопровідності, вологості й геометрії контурів у забезпеченні стабільної тепловіддачі. Обґрунтовано критичний вплив температури теплоносія на вході, гідравлічного балансування та динаміки теплового опору ґрунту на сезонну ефективність теплових насосів. Виявлено техніко-експлуатаційні умови для успішної інтеграції геотермальних систем у теплову інфраструктуру кампусу та визначено основні проблеми довготривалої стійкості багатоконтурних полів, зокрема деградацію теплового потенціалу, геологічну неоднорідність і територіальні обмеження.

У висновках доведено, що поєднання багатоконтурної структури ґрунтових полів з інтелектуальними стратегіями керування, резервуванням критичних елементів та застосуванням низькотемпературних внутрішніх мереж формує передумови для забезпечення автономного, стабільного та енергоощадного теплопостачання кампусів у довгостроковому періоді.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з такими напрямками: розробленням точніших моделей термогідродинаміки ґрунтових масивів, удосконаленням методик визначення оптимальної щільності свердловин на обмежених територіях та інтеграцією геотермальних систем у мультиджерельні енергетичні комплекси нового покоління.

Ключові слова: геотермальна енергетика кампусів, багатоконтурні ґрунтові системи, сезонна тепла ефективність, термогідродинаміка ґрунту, інтелектуальне теплове керування.

Постановка проблеми. Геотермальні теплові насоси з багатоконтурними ґрунтовими полями розглядаються як перспективна основа для формування автономних систем теплопостачання кампусів. Однак їх ефективність істотно залежить від специфіки геологічних умов, режимів експлуатації та можливостей інтеграції з існуючою інфраструктурою. Проблема полягає в недостатньому науковому обґрунтуванні основних параметрів, що забезпечують оптимальну теплову віддачу ґрунтових контурів протягом довгострокових циклів навантаження, а також у відсутності комплексних методичних підходів до проектування систем, здатних працювати у режимі повної або часткової автономії. Характерною особливістю великих освітніх та наукових кампусів є значні коливання теплового попиту, що ускладнює підтримання стабільної температурної рівноваги ґрунтового масиву та потребує розроблення енергоефективних схем регулювання. Наукові завдання полягають у дослідженні теплофізичних властивостей ґрунтів, моделюванні довгострокової динаміки температурних полів, обґрунтуванні конструктивних рішень багатоконтурних систем та визначенні умов їх оптимізації у різних кліматичних і геологічних сценаріях. Практичні завдання дослідження сформовані необхідністю вирішення таких проблем: забезпечення надійності та безперервності теплопостачання, зниження залежності кампусів від централізованих мереж, підвищення енергоефективності будівель і скорочення експлуатаційних витрат. Розв'язання зазначених завдань є визначальним для впровадження стійких низьковуглецевих рішень у сфері теплової інфраструктури та формування автономних енергетичних систем нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних досліджень дозволяє виокремити чотири основні наукові напрями. Перший напрям охоплює моделювання теплових процесів у ґрунтовому середовищі та розроблення методів діагностики стану геотермальних контурів. У дослідженні С. Поперегняка (S. Poperehnyak) та співавторів розглянуто застосування сенсорних ентропійних джерел для забезпечення достовірного контролю параметрів ґрунтових систем, які впливають на роботу теплових насосів [1]. Як показали Б. Басок (B. Basok) та співавтори, двовимірна модель теплообміну в ґрунтовому масиві дозволяє відтворювати динаміку температурного поля під час роботи горизонтальних теплообмінників [2]. Методи контролю та діагностики відмов у складних теплотехнічних системах проаналізу-

вали С. Буффа (S. Buffa) та співавтори, що є актуальним для багатоконтурних геотермальних полів [3]. У праці С. Ху (S. Hu) та співавторів узагальнено підходи до поєднання ґрунтових і сонячних низькопотенційних джерел тепла з метою стабілізації теплового балансу системи [4]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на побудову тривимірних моделей теплообміну з урахуванням анізотропії ґрунтів і взаємодії контурів високої щільності.

Другий напрям досліджень присвячений гібридизації геотермальних систем та їх інтеграції в багатоджерельні архітектури теплопостачання. У праці В. Чу (W. Chu) та співавторів систематизовано напрями розвитку сталих енергетичних систем, що включає комбіновані моделі, які інтегрують низькопотенційні джерела тепла [5]. Можливості адаптації теплових мереж до кліматичних змін дослідили Б. Басок (B. Basok) та співавтори. Вони акцентували увагу на перспективності застосування геотермальної енергії як базового елемента стабілізації теплових балансів [6]. У дослідженні Р. Хашмі (R. Hashmi) та співавторів обґрунтовано значення цифрових двійників для підвищення ефективності та безпеки відновлюваних енергетичних комплексів, що охоплюють геотермальні підсистеми [7]. Оцінку можливостей залучення CO₂-теплотруб у багатоконтурних схемах з метою інтенсифікації вилучення геотермальної енергії провели Г. Лей (G. Lei) та співавтори [8]. У межах цього напрямку подальші дослідження варто спрямувати на створення гнучких адаптивних систем, які оптимально поєднують геотермальну, сонячну та інші відновлювані енергетичні компоненти.

Третій напрям дослідження присвячений інженерним рішенням та оптимізації конструкцій багатоконтурних систем геотермального теплозабезпечення. У праці С. Чаппіді (S. Chappidi) та співавторів запропоновано комбіновану коаксіально-U-подібну замкнену систему, яка забезпечує підвищений тепловідбір порівняно з традиційними ґрунтовими теплообмінниками [9]. Серійно-паралельні схеми взаємодії теплових насосів і чилерів дослідили А. Агарід (A. Agharid) та співавтори. Така взаємодія дозволяє зменшувати енергоспоживання у великих будівлях, зокрема кампусних [10]. У своєму дослідженні Дж. Хао (J. Hao) та співавтори обґрунтували моделі оптимізації планування розподілених енергетичних систем з урахуванням геотермальних компонентів у структурі теплопостачання [11]. Експериментальне дослідження двофазних термосифонів

здійснили Х. Ліу (H. Liu) та співавтори. Вони встановили, що геометричні характеристики суттєво впливають на ефективність вилучення низькотемпературної геотермальної енергії [12]. Подальший розвиток цього напрямку варто спрямувати на вдосконалення матеріалів, структурних конфігурацій та параметризації контурів для збільшення тепловіддачі і довговічності систем.

Четвертий напрям стосується системного аналізу, енергетичної оптимізації та цифровізації теплопостачальних мереж, у яких геотермальні системи є провідним елементом автономної інфраструктури кампусів. У дослідженні С. Джу (C. Ju) та співавторів запропоновано матричний метод моделювання теплових мереж, особливістю якого є мінімізація ентропійних втрат, що може бути адаптовано до багатоконтурних геотермальних структур [13]. Вплив відновлюваних джерел енергії на ефективність інтегрованих енергетичних систем проаналізували Дж. Оєкале (J. Ouyekale) та співавтори. Отримані результати мають безпосереднє значення для автономних кампусних мереж теплопостачання [14]. Систематизацію підходів до застосування енергоефективних VRF-систем провели Р. Парамешваран (R. Parameshwaran) та співавтори. Дослідники наголосили на потенціалі синергії цих систем із геотермальними тепловими насосами [15]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на створення кіберфізичних моделей багатоконтурних ґрунтових полів, які інтегрують цифрові двійники, прогностичні алгоритми та адаптивні системи керування.

Попри значну кількість наявних досліджень, зберігається низка невирішених завдань, які стосуються аспектів роботи геотермальних систем із багатоконтурними ґрунтовими полями. Насамперед недостатньо досліджено довгострокову динаміку температурного поля за умов змінного навантаження, що ускладнює прогноз термального ресурсу. Невизначеними залишаються параметри взаємодії теплового насоса з контурами, зокрема вплив гідравлічного балансування та динаміки теплового опору на сезонну ефективність. Додаткові прогалини у знаннях стосуються інтеграції геотермальних систем у комплексні мережі кампусів, де поєднуються пікові режими, потреба в резервуванні та вимоги до енергоощадності. Переважно невирішеними залишаються питання довгострокової стабільності багатоконтурних полів, пов'язані з деградацією тепловіддачі, геологічною неоднорідністю та територіальними обмеженнями. Запропоноване дослідження заповнює окреслені прогалини, оскільки охо-

плює моделювання розвитку температурного поля, обґрунтування моделей взаємодії теплового насоса з ґрунтовими контурами, визначення інтеграційних умов для кампусних мереж і систематизацію технічних ризиків, що впливають на довгострокову роботу. Таким чином, дослідження поглиблює наукове розуміння поведінки геотермальних систем і формує базу для підвищення їх автономності, енергоефективності та надійності в реальних експлуатаційних умовах.

Постановка завдання. Мета статті полягає в науковому обґрунтуванні принципів проектування та експлуатації геотермальних теплових насосів із багатоконтурними ґрунтовими полями для забезпечення автономного теплопостачання кампусів з урахуванням теплофізичних характеристик ґрунту, динаміки теплового навантаження та вимог енергоефективності.

Завдання статті:

1. Дослідити закономірності формування та довгострокову динаміку температурного поля багатоконтурних ґрунтових систем і обґрунтувати моделі їх взаємодії з тепловими насосами для забезпечення стабільної сезонної ефективності.

2. Встановити техніко-експлуатаційні умови інтеграції геотермальних систем у теплову інфраструктуру кампусу, врахувати пікові режими споживання, енергоощадні стратегії та вимоги до надійності й резервування.

3. Виявити головні науково-практичні обмеження довгострокової стабільності багатоконтурних полів та сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації проєктних і експлуатаційних рішень з метою підвищення автономності та енергоефективності системи.

Виклад основного матеріалу. Формування та динаміка температурного поля багатоконтурних ґрунтових систем у режимах тривалого змінного теплового навантаження визначаються поєднанням теплофізичних характеристик ґрунту, геометрії контурів, інтенсивності відбору тепла та сезонних коливань попиту на теплову енергію в межах кампусу. У реальних умовах функціонування теплового насоса зумовлює поступове охолодження ґрунтового масиву в зимовий період та часткове його відновлення влітку, що формує складну багатопланову конфігурацію температурних градієнтів. Наявність багатоконтурної структури дозволяє розподіляти навантаження між різними зонами поля, зменшуючи ризик локального переохолодження, однак потребує точного моделювання з метою підтримання довготривалої теплової рівноваги. Проблема ускладнюється

неоднорідністю ґрунтів, різною теплопровідністю геологічних шарів та обмеженнями території кампусу. Ці фактори створюють труднощі при розміщенні контурів. Саме тому визначення закономірностей формування температурного поля у багатоциклових режимах є визначальним для прогнозування термального ресурсу системи та забезпечення стабільної ефективності теплового насоса (табл. 1).

У практиці сучасних кампусних енергетичних систем багатоконтурні ґрунтові поля функціонують як термодинамічно активне середовище-акумулятор, у якому температура формується під впливом сукупності взаємозалежних параметрів, систематизованих у Таблиці. Під час зимового відбору тепла навколо зондів поступово виникає термічна депресія, яка у добре насичених вологою ґрунтах поширюється повільніше завдяки високій теплопровідності та значній теплоємності. У кампусах із щільною забудовою, наприклад університетських містечках Північної Європи чи Північної Америки, це дозволяє зменшити глибину зондів і водночас підтримувати стабільність теплопостачання у періоди пікових навантажень [11]. У посушливих або дренажних ґрунтах температура знижується швидше, тому практикується збільшення міжконтурного кроку або чергування активних контурів для запобігання локальному переохолодженню. У реальних проєктах теплові масиви функціонують як довгострокові сезонні акумулятори: влітку ґрунт частково відновлює температуру через інверсію теплових потоків та відведення надлишку тепла від будівель, що особливо ефективно застосовується на кампусах зі значним навантаженням від лабораторій чи серверних [2, р. 275–276]. Багатоконтурна архітектура дозволяє застосовувати адаптивні режими керування – система автоматично перемикає

групи зондів, віддаючи пріоритет тим, у яких тепловий потенціал є більшим, що забезпечує рівномірне використання поля та знижує деградацію його продуктивності. Така організація роботи дає можливість підтримувати стабільну температуру на вході в тепловий насос протягом усього циклу, подовжувати життєвий ресурс інфраструктури та мінімізувати ризики перевантаження окремих контурів. Це критично важливо для забезпечення безперервності енергопостачання великих навчальних і наукових кампусів.

Взаємодія теплового насоса з ґрунтовими контурами визначається термодинамічними умовами компресійного циклу та тепловим станом ґрунтового поля, від якого система отримує низькопотенційне тепло. Критичними параметрами є температура теплоносія на вході, гідравлічний баланс контурів і динаміка теплового опору ґрунту. Ці чинники разом визначають сезонну ефективність коефіцієнта перетворення теплової енергії – коефіцієнта продуктивності (Coefficient of Performance, COP) та довготривалу стабільність роботи системи в умовах змінного навантаження кампусу (табл. 2).

У сучасній практиці кампусного теплопостачання взаємодія теплового насоса і ґрунтових контурів забезпечує режим адаптивної термодинамічної рівноваги, критично важливий для систем з високою сезонною варіабельністю навантаження. На прикладі північноєвропейських університетських кампусів інверторні компресори використовуються для плавного реагування на добові температурні коливання, що дозволяє утримувати COP на стабільному рівні навіть за інтенсивного зимового відбору тепла [4]. У кампусах із лабораторіями та дата-центрами активно застосовується реверсивний режим роботи, який забезпечує перенесення надлишкового літнього

Таблиця 1

Основні параметри, що визначають формування температурного поля багатоконтурних ґрунтових систем

Параметр	Опис	Практичний вплив у кампусних системах
Теплопровідність ґрунту	Здатність ґрунту передавати тепло в умовах тривалого відбору	Визначає швидкість охолодження і глибину термічної депресії навколо контурів
Вологість і насиченість	Співвідношення твердої, рідкої та газової фаз у ґрунті	Впливає на стабільність тепловіддачі та коливання сезонної ефективності
Геометрія контурів	Глибина, крок, кількість і просторове розміщення зондів	Забезпечує рівномірність навантаження та знижує ризик локального переохолодження
Інтенсивність теплового навантаження	Обсяг тепла, що вилучається тепловим насосом у різні періоди року	Формує амплітуду сезонних змін температурного поля
Час відновлення ґрунтового масиву	Тривалість природного повернення температури після періоду відбору	Визначає довгострокову здатність системи працювати без деградації ефективності

Джерело: сформовано на основі [1, р. 364–365; 2, р. 275–276; 11; 12].

тепла у ґрунтовий масив і таким чином відновлює його термальний ресурс перед опалювальним сезоном [1, р. 370]. Системи гідравлічного балансування, встановлені у багатоконтурних полях Північної Америки, дозволяють рівномірно розподіляти теплове навантаження між групами свердловин, що знижує ризик локального переохолодження та подовжує життєвий цикл контурів [10]. Завдяки використанню моделей SCOP проєктувальники отримують можливість здійснити оцінку реальної ефективності системи в річному режимі та адаптувати кількість контурів та їх глибину до геологічних умов, забезпечуючи підвищену автономність і енергостійкість кампусної інфраструктури.

Інтеграція геотермальних систем у теплову інфраструктуру кампусу потребує узгодження технічних параметрів роботи теплового насоса з динамікою внутрішньої теплової мережі, режимами споживання та вимогами до надійності. На відміну від традиційних систем, геотермальна інфраструктура не реагує миттєво на пікові зміни

навантаження, тому важливими є попереднє моделювання режимів, оптимізація гідравлічних схем та впровадження резервних і допоміжних енергетичних модулів. Техніко-експлуатаційні умови інтеграції вимагають збалансованості між сталим базовим навантаженням, можливістю покриття короткочасних піків та інтелектуальним керуванням, спрямованим на зниження енергоспоживання без компромісу щодо безперервності теплопостачання (табл. 3).

Техніко-експлуатаційна інтеграція геотермальних систем зосереджена на досягненні стабільного базового теплового внеску та ефективному керуванні короткочасними нерівностями споживання. На кампусах Канади геотермальна система зазвичай покриває приблизно дві третини середньорічного теплового навантаження, тоді як решта компенсується піковими котлами, які вмикаються лише у дні екстремально низьких температур [15, р. 120]. Це дозволяє зберігати роботу геотермальної частини у сталому режимі без перевантаження. У технічних університетах Скандинавії

Таблиця 2

Основні параметри та моделі взаємодії теплового насоса з ґрунтовими контурами

Параметр / Модель	Наукова характеристика	Вплив на сезонну ефективність і стабільність
Температура теплоносія на вході	Визначає термодинамічний стан циклу компресії пари	Зниження температури спричиняє падіння COP на 3–5 % за кожен градус
Гідравлічний баланс контурів	Рівномірність витрати в паралельних гілках	Запобігає локальному переохолодженню та зберігає стабільність подачі
Нелінійний тепловий опір ґрунту	Враховує сезонні зміни теплопровідності та накопичення теплової депресії	Дозволяє прогнозувати погіршення роботи за інтенсивного навантаження
Модель сезонного COP (Seasonal Coefficient of Performance, SCOP)	Враховує річні коливання температури ґрунту й теплового навантаження будівель	Формує реалістичну оцінку ефективності в річному циклі
Алгоритми керування інверторного компресора	Динамічне регулювання частоти обертів під тепловий попит	Підвищує гнучкість системи, знижує пікові навантаження на ґрунт

Джерело: сформовано на основі [1, р. 370; 4; 10; 13, р. 334].

Таблиця 3

Техніко-експлуатаційні умови інтеграції геотермальних систем у теплову інфраструктуру кампусу

Умова	Технічна характеристика	Значення для інтеграції
Узгодження базового теплового навантаження	Співвідношення між потужністю теплового насоса та середньодобовим тепловим попитом	Забезпечує стабільний режим роботи та мінімізує використання резервних джерел
Покриття пікових навантажень	Використання допоміжних систем: акумуляторів тепла або пікових котлів	Створює гнучкість системи та гарантує безперебійність у періоди максимального попиту
Енергоощадні стратегії керування	Алгоритми прогнозування попиту, нічне зниження потужності, теплові буферні ємності	Оптимізують споживання електроенергії та зменшують експлуатаційні витрати
Резервування системних компонентів	Дублювання насосного обладнання та ключових елементів гідравлічної схеми	Підвищує надійність і знижує ризики відмов у критичних режимах
Інтеграція з внутрішньою мережею будівель	Узгодження температурних графіків, гідравлічних опорів та часових профілів споживання	Забезпечує ефективність передачі тепла й адаптацію системи до реального споживання

Джерело: сформовано на основі [5; 6; 14; 15, р. 120].

широке застосування отримали великі буферні ємності, які акумулюють тепло нічного періоду або надлишкове тепло від систем рекуперації, вирівнюючи добові коливання попиту й суттєво знижуючи навантаження на електромережу під час пікових годин.

У кампусах з інтенсивним і нерівномірним споживанням – наприклад, наукових центрах з лабораторіями та майстернями – використовують зональне керування гідравлікою. Кожен корпус отримує тепловий потік відповідно до свого фактичного графіка роботи, що дозволяє уникати надлишкових або недостатніх подач тепла. У США поширеною практикою є дублювання насосних станцій та використання незалежних контурів циркуляції, що уможливорює обслуговування або модернізацію окремих елементів без зупинки системи [4]. На деяких кампусах із високою часткою скляних фасадів застосовуються погодні алгоритми, які враховують інсоляцію та вітрові навантаження, що дозволяє тепловому насосу працювати з нижчою потужністю у світлі години. Завдяки застосуванню наведених практичних рішень геотермальна система стає ядром інфраструктури теплопостачання кампусу, забезпечуючи поєднання стабільності, гнучкості та енергоощадності, що є обов'язковим для сучасних освітніх і наукових комплексів.

Проектування та довгострокова експлуатація багатоконтурних ґрунтових полів ускладнюються низкою науково-практичних проблем, які безпосередньо впливають на термічну стабільність системи та її здатність забезпечувати сталу тепловіддачу. Однією з основних є деградація теплового потенціалу ґрунту, яка виникає через кумулятивне охолодження масиву в умовах багаторічної експлуатації, коли процес природного відновлення температури не встигає компенсувати сезонний відбір тепла. Це призводить до поступового зниження температури теплоносія на вході та зменшення коефіцієнта продуктивності теплового насоса. Додатковою проблемою є геологічна неоднорідність, що проявляється у значних варіаціях теплопровідності та вологості між окремими шарами. Це призводить до нерівномірної роботи контурів та формування асиметричних температурних зон, що ускладнює прогнозування довгострокової тепловіддачі.

Обмеженість території кампусу створює дефіцит площі для оптимального розміщення свердловин: зменшення міжконтурного кроку підвищує теплову взаємодію між зондами та прискорює формування термічних депресій. Це особливо кри-

тично для щільно забудованих ділянок, де ґрунтове поле доводиться розташовувати у геометрично стиснутих масивах [11]. Ускладнюючим фактором є невизначеність гідрогеологічних процесів: підземні води можуть як покращувати тепловіддачу за рахунок конвекції, так і спричиняти непередбачувані перерозподіли теплових потоків, які порушують роботу моделі теплового розрахунку.

Важливою технічною проблемою є складність гідравлічного балансування багатоконтурних систем: незначні відмінності в довжині або глибині свердловин можуть спричинити нерівномірність циркуляції та прискорене охолодження окремих гілок. Довгострокову стабільність погіршує також потенційна деградація матеріалів зондів і трубопроводів під дією циклічних температурних навантажень, що вимагає контролю хімічної стійкості теплоносія та ретельного вибору полімерних матеріалів. У деяких випадках суттєвою проблемою залишається невизначеність математичних моделей, які часто спрощують реальну термогідродинаміку ґрунту, що ускладнює точне прогнозування термічного ресурсу поля в горизонті 20–30 років [13, р. 332].

Сукупність цих проблем формує багатоаспектне науково-практичне завдання – забезпечити довготривалу стабільність теплового поля в умовах складної геології, територіальних обмежень та змінного теплового навантаження, мінімізуючи ризики деградації та підвищуючи надійність системи протягом усього життєвого циклу.

Практичні рекомендації щодо оптимізації проектних рішень і режимів експлуатації геотермальних теплових насосів у кампусних системах мають ґрунтуватися на принципі поєднання стабільного базового навантаження з керованою гнучкістю та цифровізованим контролем. На етапі проектування доцільно орієнтуватися на покриття геотермальною системою більшої частини середньорічного теплового попиту кампусу, залишаючи пікові навантаження для допоміжних джерел, які працюють обмежений час. Це дає змогу зменшити встановлену потужність теплових насосів і ґрунтового поля, оптимізувати капітальні витрати та уникнути перевантаження ґрунтового масиву. Вибір конфігурації багатоконтурного поля має базуватися на детальному гідрогеологічному обстеженні з урахуванням теплопровідності, вологості, можливого руху ґрунтових вод і територіальних обмежень. Крок між свердловинами слід визначати не за емпіричними нормами, а за результатами теплотехнічного моделювання з горизонтом не менше 20–25 років.

З метою забезпечення енергоефективності та автономності особливого значення набуває впровадження інтелектуальних систем керування, які поєднують погодозалежні алгоритми, прогнозування теплового навантаження і динамічне керування групами контурів та роботою інверторних компресорів. Такі системи дають змогу згладжувати пікові навантаження, уникати надмірного охолодження окремих зон ґрунтового поля, підтримувати стабільний COP і зменшувати споживання електроенергії у години максимального тарифу. Додатковий ефект дає інтеграція геотермальної системи з низькотемпературними внутрішніми мережами опалення та вентиляції, зокрема з поверхневим опаленням, фанкойлами та рекупераційними установками, що дозволяють працювати на нижчих температурних графіках і підвищувати загальну ефективність.

Для зниження життєвого циклу витрат критично важливо закладати у проєкт сервісну придатність і модульність: застосування стандартних елементів, можливість поетапного розширення поля, дублювання ключових насосних агрегатів і вузлів керування. Рекомендованим є створення цифрового двійника геотермальної системи на основі даних, отриманих з датчиків температури, витрати і споживання енергії, що дозволяє в режимі реального часу відстежувати стан ґрунтового поля, виявляти відхилення від розрахункових режимів та своєчасно коригувати стратегію експлуатації. Поєднання таких підходів забезпечує не лише енергоощадність і високу автономність теплопостачання кампусу, а й мінімізацію сукупних витрат на проєктування, будівництво, обслуговування та модернізацію системи упродовж усього її життєвого циклу.

Висновки. У дослідженні встановлено, що ефективність геотермальних теплових насосів

з багатоконтурними ґрунтовими полями визначається узгодженою взаємодією теплофізичних властивостей ґрунту, геометрії свердловин, режимів теплового навантаження та параметрів роботи теплового насоса. Показано, що температура теплоносія на вході, гідравлічний баланс контурів і динаміка теплового опору ґрунту формують основу сезонної ефективності системи, а використання моделей SCOP та інтелектуальних алгоритмів керування створює умови для стабільної роботи в умовах нерівномірного попиту.

За результатами дослідження виявлено коло проблем, що стримують довгострокову стабільність багатоконтурних полів: поступова деградація тепловіддачі через кумулятивне охолодження, геологічна неоднорідність, обмеження простору для оптимального розміщення свердловин, непередбачуваність гідрогеологічних процесів, складність гідравлічного балансування та обмежена точність існуючих математичних моделей. Кожен із цих чинників впливає на здатність системи зберігати розрахунковий термічний ресурс протягом десятиліть. Практичні рекомендації, сформульовані в роботі, спрямовані на оптимізацію проєктування та експлуатації шляхом використання адаптивного керування, низькотемпературних внутрішніх мереж, поетапної модульності, резервування ключових вузлів та створення цифрових двійників для моніторингу стану ґрунтового поля й динамічної корекції режимів. Перспективи подальших досліджень охоплюють розроблення удосконалених багатовимірних моделей теплової еволюції ґрунту, комплексних методик розрахунку щільності й конфігурації свердловин для обмежених територій, а також інтеграцію геотермальних систем у мультиджерельні енергетичні кластери, які здатні забезпечувати стійкість і гнучкість майбутніх низьковуглецевих кампусних інфраструктур.

Список літератури:

1. Poperehnyak S., Syvachenko I., Shevchuk Y. Enhancing pseudorandom number generation using environmental sensor-based entropy sources. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop*. 2025. Vol. 3991. P. 363–380. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper26.pdf>
2. Basok B., Pavlenko A., Nedbailo O., Bozhko I., Moroz M. A Two-dimensional Numerical Model of Heat Exchange in the Soil Massif During the Operation of a Shallow Horizontal Soil Heat Exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25. P. 274–281. DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2023.029>
3. Buffa S., Fouladfar M. H., Franchini G., Lozano Gabarre I., Andres Chicote M. Advanced control and fault detection strategies for district heating and cooling systems – A review. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 1. Article 455. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010455>
4. Hu S., Liu J., Lu X., Zhang W. A Review of Geothermal–Solar Hybrid Power-Generation Systems. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 21. Article 5852. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18215852>
5. Chu W., Vicidomini M., Calise F., Duić N., Østergaard P. A., Wang Q., da Graça Carvalho M. Review of hot topics in the Sustainable Development of Energy, Water, and Environment Systems Conference in 2022. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 23. Article 7897. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16237897>

6. Basok B., Bazeev E., Pavlenko A., Kurayeva I. Municipal Heat Energy of Ukraine – Adaptation to Global Warming. *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2021. Vol. 23. DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2021.039>
7. Hashmi R., Liu H., Yavari A. Digital twins for enhancing efficiency and assuring safety in renewable energy systems: A systematic literature review. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 11. Article 2456. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17112456>
8. Lei G., Yu X., Li T., Habibzadeh-Bigdarvish O., Wang X., Mrinal M., Luo C. Feasibility study of a new attached multi-loop CO₂ heat pipe for bridge deck de-icing using geothermal energy. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 275. Article 123160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123160>
9. Chappidi S., Kumar A., Singh J. Geothermal energy extraction using a novel combined coaxial and U-shaped closed-loop system. *Geothermics*. 2024. Vol. 119. Article 102968. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102968>
10. Agharid A. P., Permana I., Wang F., Lee M. Energy-saving and carbon reduction analysis of series/parallel combination for heat pump and chiller in a hotel building. *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 325. Article 115022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115022>
11. Hao J., Yang Y., Xu C., Du X. A comprehensive review of planning, modeling, optimization, and control of distributed energy systems. *Carbon Neutrality*. 2022. Vol. 1, № 1. Article 28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00029-1>
12. Liu H., Wang X., Gan W., Gao H., Yao H., Wang Y., Zhu Y. Experimental investigation on extraction of shallow geothermal energy by flexible two-phase closed thermosyphons: Effect of geometric parameters. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 298. Article 113515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113515>
13. Ju C., Tian L., Hao J., Yang Y., Ge Z., Du X. Matrixed modeling method and entropy generation minimization analysis of heat supply system based on standard thermal resistance. *Energy Science & Engineering*. 2023. Vol. 11, № 1. P. 331–346. DOI: <https://doi.org/10.1002/ese3.1335>
14. Oyekale J., Petrollese M., Tola V., Cau G. Impacts of renewable energy resources on effectiveness of grid-integrated systems: Succinct review of current challenges and potential solution strategies. *Energies*. 2020. Vol. 13, № 18. P. 4856. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13184856>
15. Parameshwaran R., Karunakaran R. Energy efficient variable refrigerant flow systems for modern buildings. In: *Variable Refrigerant Flow Systems: Advances and Applications of VRF*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 117–144. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-6833-4_6

Forys S.M., Usenko A.Yu., Shemet T.M. GEOTHERMAL HEAT PUMPS WITH MULTILoop GROUND FIELDS FOR AUTONOMOUS CAMPUS HEAT SUPPLY

The relevance of this study arises from the growing need to transform campus infrastructure into low carbon, autonomous, and highly efficient heating systems in which geothermal heat pumps with multiloop ground fields represent one of the most promising solutions. Given the high seasonal and daily variability of thermal loads in modern campuses and the significant heterogeneity of geological conditions, there is a demand for scientifically grounded design and operational parameters for such systems.

The aim of the article is to substantiate the engineering principles of designing and operating geothermal heat pumps with multiloop ground fields, taking into account the thermophysical properties of the soil, the dynamic thermal load of the campus, and energy efficiency requirements.

The research methods include a systematic analysis of the thermophysical characteristics of soil masses, long term temperature field modeling, structural and technological analysis of heat pump performance under variable operating modes, and evaluation of the technical and operational conditions for integrating geothermal systems into campus heating networks. The study applies analytical comparisons of multiloop field configurations and their interaction parameters with heat pumps, as well as an examination of global best practices in the operation of similar systems.

The results reveal the governing patterns in the formation and evolution of temperature fields in multiloop ground masses and demonstrate the fundamental role of thermal conductivity, soil moisture, and loop geometry in maintaining stable heat extraction. The study substantiates the critical influence of inlet fluid temperature, hydraulic balancing, and the dynamics of soil thermal resistance on the seasonal efficiency of heat pumps. It also identifies the technical and operational conditions required for successful integration of geothermal systems into campus thermal infrastructure and outlines key challenges to the long term stability of multiloop fields, including heat potential degradation, geological heterogeneity, and spatial constraints.

The conclusions confirm that combining a multiloop ground field structure with intelligent control strategies, redundancy of critical components, and the use of low temperature internal heating networks creates the necessary conditions for autonomous, stable, and energy efficient campus heat supply over the long term.

Future research prospects include advancing thermohydrodynamic models of soil masses, improving methods for determining optimal borehole density in constrained areas, and integrating geothermal systems into next generation multisource energy complexes.

Key words: campus geothermal energy, multiloop ground systems, seasonal thermal efficiency, soil thermohydrodynamics, intelligent thermal control.

Дата надходження статті: 24.11.2025

Дата прийняття статті: 17.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.85:504.4.054:502.131.1:005.584(4)
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/22>

Валерко Р.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Пацева І.Г.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Герасимчук Л.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Кириленко Н.П.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Бондарчук В.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ІНТЕГРАЦІЯ ESG-КРИТЕРІЇВ ТА СТАНДАРТІВ ЄС У СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ КАР'ЄРНИМИ ВОДАМИ ГІРНИЧОЇ ГАЛУЗІ: ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ, МОНІТОРИНГ ТА ІНСТРУМЕНТИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

У статті представлено результати комплексного аналізу інтеграції ESG-критеріїв та нормативно-правових стандартів Європейського Союзу у систему управління кар'єрними водами гірничодобувних підприємств. Обґрунтовано необхідність модернізації водного менеджменту з огляду на зростання техногенного навантаження на гідросферу, посилення екологічних ризиків і вимог стейкхолдерів щодо прозорості екологічної діяльності. Встановлено, що кар'єрні води являють собою багатокомпонентний техногенний потік, у складі якого переважають сульфати, хлориди, завислі речовини, важкі метали та продукти окиснення сульфідовмісних порід, що зумовлює ризики вторинного забруднення поверхневих і підземних вод та формування кислотного дренажу. Систематизовано вимоги ключових регуляторних документів ЄС, зокрема, Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС, Директиви 2006/21/ЄС щодо відходів добувної промисловості, Директиви 2010/75/EU (IED) та Регламенту 2020/852 (Таксономія ЄС), які визначають критерії оцінювання екологічного стану вод, підходи до управління ризиками та необхідність застосування найкращих доступних технологій у сфері очищення та моніторингу техногенних вод. Показано, що ESG-підхід формує методологічну основу для поєднання екологічних, соціальних і управлінських індикаторів сталого водокористування, сприяє підвищенню корпоративної відповідальності, мінімізації впливу на водні ресурси та посиленню екологічної безпеки гірничих регіонів. Особливу увагу приділено цифровим інструментам моніторингу – IoT-сенсорам, ГІС-технологіям і цифровим двійникам, які забезпечують високоточну діагностику, автоматизоване відстеження динаміки параметрів води та моделювання можливих сценаріїв трансформації водних потоків. Запропоновано концептуальну модель ESG-орієнтованого управління кар'єрними водами, що поєднує вимоги європейського регуляторного поля, цифрові технології, циркулярні підходи до водокористування та інструменти екологічного менеджменту. Практична реалізація моделі сприяє зменшенню техногенного навантаження, підвищенню ефективності моніторингу та гармонізації української гірничої галузі з європейськими стандартами сталого розвитку.

Ключові слова: кар'єрні води, гірничодобувна промисловість, екологічні ризики, сталий розвиток, ESG-підхід, управління водними ресурсами, екологічна відповідальність, екологічна політика ЄС.

Постановка проблеми. Гірничодобувна галузь формує значний техногенний тиск на водні ресурси, а кар'єрні води є одним з найбільш проблемних потоків забруднення. За даними досліджень, дренажні та шахтно-кар'єрні води спричиняють підвищення мінералізації, засолення, закислення та накопичення важких металів у річкових і підземних водних системах, що призводить до деградації біорізноманіття та погіршення екологічного стану водойм [1–3]. У межах реалізації Водної рамкової директиви ЄС 2000/60/EC (WFD) до 2027 року держави мають забезпечити досягнення «доброго» хімічного та екологічного стану вод, однак виконання цієї вимоги у регіонах гірничої діяльності залишається проблемним [4, 5].

Водночас ЄС запроваджує нові інструменти сталого розвитку, а саме: EU Taxonomy, ESG-звітність, оновлені вимоги до прозорості екологічних даних, які прямо стосуються водокористування та водного впливу гірничих підприємств. ESG-підходи визнані ефективним механізмом зменшення екологічних ризиків і стимулювання екологічних інновацій у водному секторі.

Для України, що адаптує екологічне законодавство до стандартів ЄС, питання інтегрованого управління кар'єрними водами є особливо важливим у контексті модернізації промисловості й переходу до сталого видобутку. Саме тому розроблення моделі, яка поєднує вимоги WFD, ESG-критерії та інструменти сталого водного менеджменту, є своєчасним і науково значущим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика впливу гірничодобувної діяльності на водне середовище активно розглядається у сучасній науковій літературі [6–8]. Численні дослідження підтверджують, що скидання кар'єрних вод є одним із провідних чинників деградації поверхневих водних екосистем, зокрема через підвищення концентрацій заліза, марганцю, сульфатів, азотовмісних сполук та зниження рН, що погіршує якість води та екологічний статус водотоків [1–3].

Проблема впливу гірничодобувної діяльності на водне середовище все частіше розглядається крізь призму ESG-підходів та європейських екологічних стандартів. У низці робіт показано, що для сучасних гірничих підприємств ключовим стає управління ESG-ризиками на всіх стадіях життєвого циклу родовища, зокрема щодо водокористування та забруднення водних ресурсів [9], а також пріоритизація саме водних ESG-ризиків у регіонах із напруженою водогосподарською ситуацією [10]. У секторі водного господарства ESG-підходи розглядаються як драйвер сталих інновацій, що мають поєднувати екологічну результативність,

прозорість розкриття інформації та відповідність цілям сталого розвитку [11]. Європейські дослідження, присвячені соціальним та екологічним наслідкам гірничої діяльності та впливу політики ЄС на процедури дозволів, підкреслюють зростаючу роль Водної рамкової директиви (2000/60/ЄС) та пов'язаних з нею вимог до охорони водних екосистем і водозаборів у контексті видобутку корисних копалин [12].

Окремий напрямок становлять роботи, спрямовані на формування методології та показників ESG-звітності, у тому числі для водного менеджменту. Прикладні дослідження щодо гірничих компаній демонструють, що блоку «Е» (environmental) дедалі частіше включає показники забору води, скидів забруднених вод, ступеня очищення та інвестицій у водоохоронні заходи, хоча деталізація саме кар'єрних вод залишається недостатньою [13].

Паралельно розвивається напрямок цифрових систем моніторингу, що поєднують сенсорні мережі, технології інтернету речей (IoT), дистанційне зондування Землі та ГІС-платформи для безперервного контролю якості води. Оглядові публікації засвідчують швидкий розвиток сенсорних технологій для моніторингу гідрохімічних показників, застосування методів машинного навчання для інтерпретації великомасштабних даних і підтримки прийняття рішень у водному менеджменті [14, 15]. Розвиток дистанційного зондування та ГІС демонструє потенціал просторово-часового аналізу водних об'єктів, зокрема у районах інтенсивного природокористування [16]. Водночас класичні роботи з управління кар'єрними та шахтними водами у контексті Водної рамкової директиви наголошують на необхідності інтегрованого, басейнового підходу, врахування постмайнінгової фази та довгострокових зобов'язань щодо якості води [17].

Попри наявність розвинених концепцій ESG, цифрового моніторингу та європейських нормативних вимог, досі бракує прикладних досліджень, що комплексно поєднують ці три складові саме в системах управління кар'єрними водами гірничої галузі. Запропонована у статті постановка задачі спрямована на заповнення цієї прогалини, зосереджуючись на оцінці екологічних ризиків, цифровізації моніторингу та адаптації вимог європейського водного законодавства до практики управління кар'єрними водами.

Постановка завдання. Метою статті є обґрунтування науково-методичних підходів до інтеграції ESG-критеріїв та екологічних стандартів Європейського Союзу у систему управління кар'єрними водами підприємств гірничої галузі з урахуванням сучасних екологічних ризиків,

зростаючих вимог стейкхолдерів та принципів сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу. Кар'єрні води є складним техногенно-геохімічним утворенням, що формується внаслідок сукупної дії природних та антропогенних факторів. Їхнє утворення зумовлюється інфільтрацією атмосферних опадів, надходженням ґрунтово-напірних вод, порушенням гідрогеологічних структур та впливом вибухових і транспортних операцій. За сучасними дослідженнями, гідрохімічні характеристики кар'єрних вод визначаються мінеральним складом гірських порід, інтенсивністю окисно-відновних процесів та техногенними потоками забруднювачів.

Суттєвими екологічними ризиками є:

- зростання мінералізації та сульфатності, що призводить до порушення осмотичного режиму водних організмів;
- підвищені концентрації завислих речовин, які спричиняють замулення русел та деградацію нерестових ділянок;
- формування кислотного дренажу (AMD) через окиснення сульфідовмісних порід;
- міграція важких металів та токсичних мікроелементів у зв'язаній та розчинній формах;
- гідрологічна трансформація водозборів, пов'язана з відкачуванням та скидом вод, що може призводити до зниження рівнів підземних вод.

Наявність таких ризиків свідчить про необхідність інтегрованого управління кар'єрними водами відповідно до критеріїв Водної рамкової директиви ЄС, зокрема щодо запобігання погіршенню екологічного стану водних масивів та обмеження техногенного навантаження.

У межах європейської екологічної політики питання техногенних вод регулюється низкою директив і стандартів, що формують комплексну систему управління ризиками. Найбільш значущими для гірничих підприємств є:

1. Водна рамкова директива 2000/60/ЄС, яка визначає критерії досягнення «доброго екологічного стану» поверхневих та підземних вод, упроваджує басейновий принцип управління та вимагає систематичного моніторингу.
2. Директива 2006/21/ЄС щодо управління відходами добувної промисловості, яка регламентує порядок поводження з шахтно-кар'єрними водами як із специфічною формою рідких відходів.
3. Директива 2010/75/EU (IED), яка зобов'язує підприємства застосовувати найкращі доступні технології (BAT) для мінімізації викидів у довкілля, включно з техногенними водами.
4. Регламент ЄС 2020/852 (Таксономія ЄС), що визначає екологічні критерії сталості опера-

цій підприємств і встановлює принцип «Do No Significant Harm» для водних ресурсів.

5. CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive), яка вводить обов'язкову нефінансову звітність та розширені показники водокористування.

Гармонізація українського законодавства з наведеними регуляторними актами створює передумови для модернізації системи управління кар'єрними водами відповідно до європейських стандартів екологічної безпеки та сталого розвитку.

Концепція ESG перетворюється на ключовий інструмент оцінювання екологічно відповідального ведення бізнесу у гірничому секторі. Інтеграція ESG-компонентів у менеджмент кар'єрних вод дозволяє формувати системну модель екологічного управління, що включає екологічний, соціальний та управлінський виміри системи управління кар'єрними водами (рис. 1).

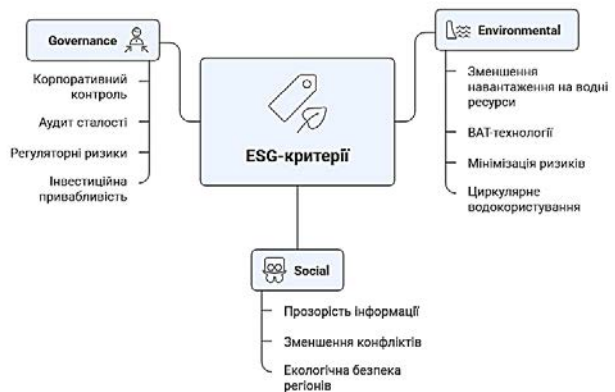


Рис. 1. ESG-критерії в управлінні кар'єрними водами

Таким чином, ESG-фреймворк виконує роль універсального механізму гармонізації технологічних, екологічних та управлінських аспектів водного менеджменту.

Удосконалення системи моніторингу кар'єрних вод є ключовою умовою мінімізації ризиків і забезпечення відповідності європейським стандартам. На сучасному етапі найбільшу ефективність демонструють цифрові технології такі як: інтернет речей (IoT), ГІС, концепція цифрового двійника (Digital Twin).

Мережі IoT-сенсорів забезпечують безперервний контроль параметрів якості води (рН, електропровідність, Eh, концентрації SO_4^{2-} , Fe, Mn, важких металів) із високою часовою роздільною здатністю. Використання автоматизованих систем передавання даних дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормативів і реагувати на потенційні аварійні ситуації.

ГІС-технології сприяють просторовому аналізу та картографуванню зон впливу, моделюванню міграції забруднювачів, оцінці водного балансу та визначенню екологічно вразливих територій. Інтеграція ГІС із польовими даними створює основу для ухвалення управлінських рішень.

Digital Twin дозволяє моделювати гідродинамічні процеси та поведінку домішок у режимі реального часу, оцінювати ефективність різних сценаріїв очищення та прогнозувати зміни у разі впровадження нових технологій. Це забезпечує перехід від реактивного до превентивного управління техногенними водами.

Комплекс заходів сталого управління кар'єрними водами охоплює:

- циркулярне водокористування, що передбачає повторне застосування технічних вод у виробничих процесах;
- оптимізацію дренажних систем із метою зниження обсягів відкачування;
- модернізацію очисних споруд шляхом впровадження високоефективних технологій осадження, коагуляції, мембранної фільтрації, біоремедіації;
- екологічну логістику водних потоків, спрямовану на мінімізацію транспортування забруднених вод;
- створення систем нефінансової звітності, сумісних із CSRD, GRI та ISO 14046 (водний слід).

Застосування таких інструментів формує інтегровану модель управління, що відповідає європейським стандартам екологічної безпеки та принципам сталого розвитку.

Отже, на основі проведеного аналізу розроблено концептуальну модель інтегрованого управління кар'єрними водами, яка включає:

1. Ідентифікацію екологічних ризиків та визначення компетенцій відповідно до директив ЄС.
2. Створення комплексної системи моніторингу, що базується на IoT, ГІС і аналітичних платформах.
3. Використання цифрового моделювання для прогнозування поведінки водних потоків та оцінювання ефективності різних сценаріїв очищення.

4. Інтеграцію ESG-критеріїв у корпоративне управління водними ресурсами.

5. Розроблення стратегії сталого водокористування, орієнтованої на мінімізацію негативного впливу на довкілля та виконання міжнародних стандартів.

Застосування зазначеної моделі дозволяє забезпечити високий рівень екологічної безпеки гірничих підприємств, підвищити ефективність водного менеджменту та сприяти формуванню конкурентоспроможної та екологічно відповідальної гірничої галузі.

Висновки. Дослідження підтвердило, що кар'єрні води є суттєвим техногенним чинником впливу на водні екосистеми, а їхній хімічний склад і обсяги формують високі екологічні ризики. Наявні підходи до управління цими водами не забезпечують повної відповідності сучасним екологічним вимогам та потребують модернізації.

Аналіз регуляторних документів ЄС засвідчив, що впровадження положень Водної рамкової директиви, Директиви щодо відходів добувної промисловості, Директиви IED та Регламенту ЄС 2020/852 формує чіткі вимоги щодо моніторингу, очищення та контролю техногенних вод. Їх імплементація є ключовою умовою підвищення екологічної безпеки гірничих підприємств.

Інтеграція ESG-критеріїв визначена як ефективний механізм удосконалення системи водного менеджменту, оскільки дозволяє поєднати технологічні, екологічні, соціальні та управлінські аспекти діяльності підприємств.

Встановлено, що застосування цифрових технологій, а саме: IoT-моніторингу, ГІС-аналізу та цифрових двійників забезпечує підвищення точності контролю та прогнозування стану кар'єрних вод і сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Запропонована модель ESG-орієнтованого управління кар'єрними водами сприяє зменшенню техногенного навантаження, гармонізації з вимогами ЄС та переходу гірничих підприємств до принципів сталого розвитку.

Список літератури:

1. Santana C. S., Montalván Olivares D. M., Silva V. H. C., Luzardo F. H. M., Velasco F. G. Assessment of water resources pollution associated with mining activity in a semi-arid region. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 273. 111148. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111148>.
2. Mitko K., Dydo P., Milewski A. K., Bok-Badura J., Jakóbi-Kolon A., Krawczyk T., Cieplak A., Krodzińska M., Spyra A., Gzyl G., et al. Mine Wastewater Effect on the Aquatic Diversity and the Ecological Status of the Watercourses in Southern Poland. *Water*. 2024. 16(9). 1292. <https://doi.org/10.3390/w16091292>.
3. Cesar Minga J., Elorza F. J., Rodriguez R., Iglesias A., Esenarro D. Assessment of Water Resources Pollution Associated with Mining Activities in the Parac Subbasin of the Rimac River. *Water*. 2023. 15(5). 965. <https://doi.org/10.3390/w15050965>.
4. Voulvoulis N., Arpon K. D., Giakoumis T. The EU Water Framework Directive: From great expectations to problems with implementation. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 575. P. 358–366. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.228.

5. Pellegrini E., Dalmazzone S., Fasolino N. G., Frontuto V., Gizzi P., Luppi F., Moroni F., Raggi M., Zanni G., Viaggi D. Economic Analysis under the Water Framework Directive: The State of the Art and Way forward. *Water*. 2023; 15(23). 4128. <https://doi.org/10.3390/w15234128>.
6. Валерко Р. А., Бондарчук В. М., Герасимчук Л. О. Екологічна оцінка якості поверхневих вод у зоні діяльності підприємств гірничо-видобувної галузі. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2025. Вип. 4(153). С. 73–81. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.4.8>.
7. Валерко Р. А., Бондарчук В. М., Герасимчук Л. О. Кореляційний аналіз показників складу кар'єрних вод у контексті оцінки антропогенного навантаження на річкові екосистеми. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 4(61). С. 135–140. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.22>.
8. Bondarchuk V. M., Valerko R. A. Identification of pollution sources and clustering of hydrochemical parameters of quarry water in the area of mining enterprise operations. *Science and education under the influence of global challenges : proceedings of the II International scientific and practical conference / International Humanitarian Research Center* (Chernihiv, 2025, July 15). Research Europe, 2025. P. 60–63. DOI: <https://doi.org/10.64076/ihr250715.09>.
9. Maybee B., Lilford E., Hitch M. Environmental, Social and Governance (ESG) risk, uncertainty, and the mining life cycle. *The Extractive Industries and Society*. 2023. Art. 101244. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101244>.
10. Garcia-Zavala C., Ordens C.M., Pagliero L., Lèbre E., Stringer M. An approach for prioritising environmental, social and governance (ESG) water-related risks for the mining industry: The case of Chile. *The Extractive Industries and Society*. 2023. Article 101259. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101259>.
11. Minea G., Lakatos E. S., Druta R. M., Moldovan A., Lupu L. M., Cioca L. I. The Role of ESG in Driving Sustainable Innovation in Water Sector: From Gaps to Governance. *Water*. 2025. 17(15). 2259. <https://doi.org/10.3390/w17152259>.
12. Streit S., Passarella M., Tost M. The influence of environmental policies on mineral permitting in Europe: Challenges and insights from Spain and Sweden. *The Extractive Industries and Society*. 2025. Vol. 24. Article 101727. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101727>.
13. Pavloudakis F., Kirtikidis S., Roumpou C., Agioutantis Z.G. ESG Reporting in the Mining Sector: Case Studies from Greek Industry Leaders. In: *Proceedings of Sustainable Development in the Minerals Industry (SDIMI 2024)*, 9 - 11 July 2024, Turin, Italy. P. 73–77.
14. Chen H., Gao X., Yuan R. Advances in Remote Sensing and Sensor Technologies for Water-Quality Monitoring: A Review. *Water*. 2025. 17(20). 3000. <https://doi.org/10.3390/w17203000>.
15. Dharmarathne G., Abekoon A.M.S.R., Bogahawaththa M., Alawatugoda J., Meddage D.P.P. A review of machine learning and internet-of-things on the water quality assessment: Methods, applications and future trends. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. 105182. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105182>.
16. Parra L. Remote Sensing and GIS in Environmental Monitoring. *Applied Sciences*. 2022. 12(16). 8045. <https://doi.org/10.3390/app12168045>.
17. Wolkersdorfer Ch. Mine Water Management and the Water Framework Directive. In: *Proceedings Post-Mining 2005*. Nancy, 2005. P. 1–8.

Valerko R.A., Patseva I.H., Herasymchuk L.O., Kyrylenko N.P., Bondarchuk V.M. INTEGRATION OF ESG CRITERIA AND EU STANDARDS INTO THE MINE WATER MANAGEMENT SYSTEM OF THE MINING INDUSTRY: ENVIRONMENTAL RISKS, MONITORING, AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT TOOLS

The article presents the results of a comprehensive analysis of the integration of ESG criteria and the regulatory standards of the European Union into the mine water management system of mining enterprises. The necessity of modernizing water management is substantiated in view of the increasing technogenic pressure on the hydrosphere, the intensification of environmental risks, and the growing demands of stakeholders for transparency in environmental performance. It is established that mine water represents a multicomponent technogenic flow dominated by sulfates, chlorides, suspended solids, heavy metals, and oxidation products of sulfide-bearing rocks, which pose significant risks of secondary contamination of surface and groundwater, as well as the formation of acid mine drainage. The requirements of key EU regulatory documents are systematized, including the Water Framework Directive 2000/60/EC, Directive 2006/21/EC on the management of waste from extractive industries, Directive 2010/75/EU (IED), and Regulation 2020/852 (EU Taxonomy), which define criteria for assessing the ecological status of water bodies, approaches to risk management, and the necessity of implementing best available techniques (BAT) for the treatment and monitoring of technogenic waters. It is shown that the ESG approach forms a methodological basis for integrating ecological, social, and governance indicators of sustainable water use, strengthening corporate responsibility, minimizing impacts on water resources, and enhancing environmental safety in mining regions. Particular attention is devoted to digital monitoring tools – IoT sensors, GIS technologies, and digital twins which ensure high-precision diagnostics, automated tracking of water quality dynamics, and modelling of potential scenarios of water flow transformation. A conceptual model of ESG-oriented mine water management is proposed, combining EU regulatory requirements, digital technologies, circular water-use approaches, and instruments of environmental management. Practical implementation of the model will contribute to reducing technogenic pressure, improving monitoring efficiency, and harmonizing the Ukrainian mining industry with European sustainable development standards.

Key words: mine water, mining industry, environmental risks, sustainable development, ESG approach, water resource management, environmental responsibility, EU environmental policy.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 12.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.054.82

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/23>

Волошин В.С.

Приазовський державний технічний університет

ВІДХОДИ В ТЕХНОЛОГІЯХ РЕЦИКЛІНГУ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ (НА ПРИКЛАДІ ПЕРЕРОБКИ ДОМЕННИХ ШЛАКІВ)

Розроблено структурно-ієрархічну модель послідовного перетворення неорганічних компонентів металургійних шлаків у квазіполімерні структури, в яких кожен попередній етап переробки утворює відходи, які є сировиною для наступного етапу. На прикладі технології геополімеризації доменних шлаків досліджуються процеси утворення як товарної продукції, так і появи нових відходів, вид і якість яких виводяться з термодинамічних співвідношень між відпрацьованою похідною сировиною і базовою енергією, що використовується в даному технологічному процесі переробки. Зокрема, особлива увага приділяється ролі ентропії проміжних продуктів і температурних режимів в ефективності залучення шлакових компонентів (Ca, Mg, Fe, Al) в геополімерну матрицю. Показано, що при оптимальній послідовності змішування реагентів: $H_2O \rightarrow NaOH \rightarrow Na_2SiO_3$ підвищується стабільність і запобігається передчасне осадження, компоненти, що не прореагували переводяться в активний стан, тим самим мінімізуючи відходи Ca, Mg, Fe, Al в технології геополімеризації. Звернення до термодинамічних показників в технологіях переробки дає можливість об'єктивно оцінити можливості таких технологій щодо мінімізації відходів другого рівня. Показано, що полімеризація неорганічних компонентів, як кінцевий технологічний процес утилізації доменних шлаків, відбувається в суворій ієрархічній послідовності, а вплив кожної з послідовних структур Q^n на процеси утворення відходів строго регламентується умовами контролю за параметрами процесу. Повторні відходи в технологіях переробки відходів є менш ентропійними по відношенню до основної енергії, а значить, є вкрай проблематичними для подальшої утилізації при мінімумі їх утворення в конкретному технологічному процесі. Встановлено, що зниження ентропії сприяє більш глибокій переробці та мінімізації залишкових відходів. Запропонована методика оцінки ентропійних характеристик геополімерних структур дозволяє краще розуміти взаємодію між взаємопов'язаними технологічними процесами, спрямованими на мінімізацію промислових відходів, що сприяє розробці недорогих та екологічно стійких рішень при рециклінгу доменного шлаку та може бути основою для застосування аналогічного підходу для інших видів відходів.

Ключові слова: переробка, доменні шлаки, геополімери, геополімерна структура, мінімізація відходів, ентропія системи, термодинамічна дуальність.

Постановка проблеми. Сучасні технології переробки металургійних відходів вимагають сучасних підходів до мінімізації повторних відходів для таких технологічних процесів. Питання оцінки ефективності переробки металургійних відходів і появи нових і перспективних енергозберігаючих матеріалів стають актуальними для сучасної металургії, в тому числі, в сенсі вторинних відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На перший погляд, досить велика кількість методів переробки металургійного шлаку має дати впевненість у можливостях повної утилізації цих

не завжди безпечних технологічних відходів. Найбільш типові в технологічному відношенні і досить прості з них пов'язані з механічними способами подрібнення, сортування і фізичного відділення шлакових компонентів без хімічної модифікації його складу з відділенням металевих включень і феритів для вторинного використання в металургії. Однією з найсучасніших сфер застосування таких шлаків є технологія геополімеризації неорганічних компонентів металургійних шлаків як відходів попереднього технологічного рівня [1, с. 137, 2, с. 4]. Її можна позиціонувати як багатоступінчасту технологію переробки відходів

© Волошин В.С., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

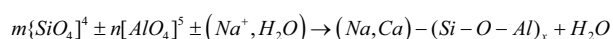
і однією з базових технологій в «блакитній економіці» майбутнього [3, с. 1593-1594].

Ми розглянемо досить актуальну для даної теми публікацію [4, с. 1654], в якій така технологія показана у вигляді ієрархічно пов'язаних послідовних перетворень неорганічної речовини в квазіполімерний матеріал, як приклад утворення відходів в технологіях переробки промислових відходів, описаних в роботі [5, с. 390]. Під такими технологіями ми будемо розуміти послідовний ланцюжок технологічних процесів: доменна плавка – магнітомеханічна сепарація шлаку – подрібнення неметалевої частини доменного шлаку – технологія геополімеризації – нові відходи. Кожний $J_{w(i)}$ – *ий відхід у попередньої і – ї технології є сировиною* $J_{0(i+1)}(i+1)$ у наступному $i+1$ -му технологічному процесі. Такі технологічні процеси добре відомі в літературі і описуються з точки зору вмісту в них відходів [6, с. 89, 7, с. 145, 154]

Постановка завдання. Створити методи аналізу ефективності технологій рециклінгу металургійних відходів з метою мінімізації їх вторинного відходоутворення.

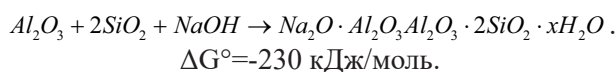
Виклад основного матеріалу. Нас буде цікавити технологія геополімеризації як кінцевий технологічний процес, в якому є можливості для мінімізації внутрішніх відходів. Класична технологія отримання геополімерів з доменного шлаку включає в себе наступні етапи технологічного процесу [6, с. 92-96]: підготовка сировини, подрібнення і сушка доменного гранульованого шлаку; класифікація по фракціях; змішування шлаку з активатором – найчастіше NaOH, KOH або водним розчином силікату натрію (Na_2SiO_3); лужна активація; реакція утримання суспензії та полімеризація при контрольованій температурі (20–80 °C). Процеси поліконденсації і полімеризації в технології виробництва геополімерів пов'язані з утворенням тривимірної структури алюмосилікатного гелю (геополімеру) з активованих компонентів [7, с. 148]. Подальша технологічна процедура пов'язана з пресуванням/литтям у форми та подальшим затвердінням геополімеру при кімнатній температурі або при нагріванні (до 60–80 °C).

Хімічні реакції, що лежать в основі технології, включають в себе активацію шлакової структури $[\text{Ca-Al-Si-O}]$ за допомогою NaOH і Na_2SiO_3 із забезпеченням високого рівня pH (~13–14), розпад аморфних фаз і створення алюмосилікатного гелю $\{\text{Na-Ca-Al-Si-O}\}$



Стандартні зміни енергії Гіббса (ΔG°) при 25 °C, за даними NIST (National Institute

of Standards and Technology) та [1, с. 164], для реакції розчинення і виробництва олігомерів $\text{SiO}_{2,\text{amorph}} + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, $\Delta G^\circ = -126$ кДж/моль. для реакції формування геополімерів (узагальнена)



Спочатку, щоб систематизувати можливі варіанти полімеризації та їх вплив на утворення відходів у даній технології, розглянемо способи аналізу послідовно мінливої структури квазіполімерів, створених на основі неорганічних речовин. Звернемося до результатів роботи [4, с. 1671-1672], в якій представлені дані експериментів з предикативною моделлю, в тому числі ^{29}Si NMR (nuclear magnetic resonance, ядерний магнітний резонанс ізотопу кремнія-29) та термодинамічне моделювання. Використовуючи такі дослідження, можна по-іншому поглянути на конструкцію «вікон термостійкості» для квазіполімерних «розчинів» (рис. 1).

Згідно з результатами [4, с. 1672], максимальна поліконденсація знаходиться на модулі $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1.2$ в умовах $T \sim 55\text{--}90$ °C. Стабільне формування геополімерного $N\text{--}A\text{--}S\text{--}H$ гелю відбувається при $\text{pH } 12\text{--}13.5$, $W/S < 0.5$, $T > 40$ °C. За нашими даними, «теплове вікно стабільності» розчину знаходиться в проектному діапазоні $T = 49\text{--}73$ °C з молярним співвідношенням $\text{Si/Na} \approx 1.0\text{--}1.4$, при якому потенціал Гіббса ΔG для створення гелю є мінімальний (див. рис. 1). Це може вказувати на мінімальну ентропію для такої конструкції матеріалу з мінімальними відходами щодо традиційних Na , SiO_2 і супутніх відходів у вигляді гідратів і відкладень.

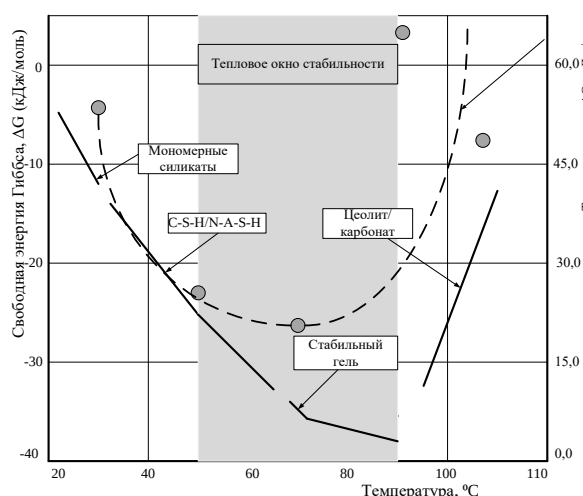


Рис. 1. Модель «теплого вікна стабільності» у технології геополімеризації

Тут геополімерна структура формується оптимально: 49–73 °С, при більш широкому модулі 1–1.4, та більш вузькому діапазоні $pH \sim 13$ –13.5 (див. рис. 1). Показано, що при оптимальній послідовності змішування реагентів: $H_2O \rightarrow NaOH \rightarrow Na_2SiO_3$ Підвищується стійкість і запобігає передчасному осіданню, не прореаговані компоненти переводяться в активний стан, тим самим мінімізуючи повторні відходи Ca , Mg , Fe і Al в технології геополімеризації.

Таким чином, для нашого дослідження важливим є наступне. Полімеризація неорганічних компонентів відбувається в суворій ієрархічній послідовності, і на кожному з цих етапів процесу утворення відходів строго регламентуються умовами контролю параметрів технологічного процесу. У параметричному сенсі пропонується використовувати такий універсальний показник, як зміна ентропії системи.

Для цього розглянемо технологічний процес виробництва геополімерів як термодинамічно двосдину систему: коли одна частина сировини J_0 належить до базової енергії, як термодинамічно сильно нерівноважна система, в результаті чого виходить товарний продукт [5, с. 184]. А інша частина сировини J_w , пов'язана з базовою енергією в стані слабкої термодинамічної нерівноваги, і вона є джерелом промислових відходів.

Термодинамічні сили X_0 і X_w , що приймають участь в перетворенні цих частин сировинного потоку, будуть визначатися за формулою $x = -\frac{1}{T} \frac{\partial G}{\partial J}$. Для продуктивної частини ($J_0 = 850$ кг): $x_0 = -\frac{1}{298K} \frac{-230000 \text{ Дж}}{850 \text{ кг}} = +0,906 \frac{\text{Дж}}{K \cdot \text{кг}}$. Для відходів ($J_w = 150$ кг), гідратація $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$, $\Delta G^0 = -64 \text{ кДж / моль}$: $x_w = -\frac{1}{298} \frac{-64000}{850} = +0,252 \frac{\text{Дж}}{K \cdot \text{кг}}$.

Розрахуємо зміну ентропії ΔS на одиницю $E_0 = 5300 \text{ кДж/т}$ сировини, що пов'язано із отриманням товарної продукції (геополімера).

$$\frac{\Delta S_0}{E_0} = \frac{X_0 J_0}{E_0} = \frac{906 \cdot 0,85}{5300} = 0,145 \cdot 10^{-3} \text{ I/K}$$

$$\frac{\Delta S_w}{E_0} = \frac{X_w J_w}{E_0} = \frac{252 \cdot 0,15}{5300} = 0,007 \cdot 10^{-3} \text{ I/K}$$

Важливим показником в технологічному процесі, з позицій утворення відходів, є стійка структура перетвореного квазіполімеру, коли на різних етапах технологічного процесу є не тільки умови для послідовної неорганічної полімеризації, але і для виникнення нових відходів. Позначимо такі проміжні ієрархічні стани, як Q^n , $n=1, 1,5$ від мономерності до полімеризації такої структури. Вони розрізняються за кількістю з'єднань за компонентністю $Si-O-X$, особистою ентальпією ΔH і енергією Гіббса ΔG (табл. 1). Зміна ентропії для кожного структурного стану квазіполімеру з урахуванням його кінцевого геополімерного стану Q^5 розраховується як $\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T}$. Нормовані значення віднесемо до величини базової енергії,

що використовується в технологічному процесі. Видимі значення негативної зміни ентропії свідчать про збільшення впорядкованості не тільки в структурі геополімеру, але і в ступені послідовного засвоєння компонентів відходів в технології. Для визначення ступеня участі потенційних відходоутворюючих компонентів в процесі геополімеризації слід враховувати конфігураційну ентропію S^c , яка в термодинамічній моделі розраховується як

$$S_{Q^n}^c = -p \sum (x_n \cdot \ln x_n),$$

де: x_n – мольна доля кожної з одиниць Q^n , а $p = -8,314 \text{ Дж / моль} \cdot K$.

Розрахунки показують, що при збільшенні ступеня поліконденсації і полімеризації основного складу ($Q^1 \rightarrow Q^5$) конфігураційна ентропія $S_{Q^n}^c$ різко знижується від мономерного, найменш організованого стану, до полімеру з найбільш упорядкованою структурою системи, в якому є місце потенційним відходам даного виробництва. Стан відходоутворюючої частини компонентів, що беруть участь в процесах термодинамічних процесах полімеризації, починаючи з участі в утворенні лінійних ланцюгів Q^3 , також супроводжується зниженням конфігураційної ентропії більш ніж в півтора рази та вона на порядок більше, ніж для основної продукції. Частина потенційних відходів також приймає участь в процесах полімеризації, тим самим зменшуючи відхідну частину технологічного процесу.

В основі таких змін лежить енергія Гіббса ΔG , яка збільшується по модулю, так як базова енергія системи стабілізована, а спонтанність реакції обмежена. Принцип термодинамічної двоєдності [5, с. 257–258] дозволяє пояснити, чому, як мінімум 15% вихідного доменного шлаку не включаються до геополімерних структур і створюють додаткові відходи: вони утворюють термодинамічно менш вигідні сполуки ($Ca(OH)_2$, Fe -гідрати), які складають власну частину цих відходів. При цьому базова енергія на обробку продукту розподіляється нерівномірно, так як $X_0 \ll X_w$, не на користь продукції.

Встановлено, що чим нижча ентропія проміжного квазіполімерного продукту, тим більше компонентів може бути включено до нього при деякому енергетичному додаванні у вигляді E_w або модифікації E_0^w [5, с. 198]. Ці компоненти (Ca , Mg , Fe , Al) залишаються в термодинамічно рівноважних або близьких до рівноважних станах, таких як $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$ та ін., і тому не беруть участі в конструкції геополімера, утворюючи відходи. Таким чином, зміна ентропії структури геополімеру є основою для контролю підбору компонентів, що утворюють відходи процесу.

Структура і характер Q^n в порівнянні з термодинамічними показниками станів, що орієнтовані на формування відходів послідовної структури

Q^n	Характер	Зв'язки Si-O-X	Ентальпія ΔH° , кДж/моль	Енергія Гіббса ΔG° , кДж/моль	Зміна ентропії ΔS , Дж/К·моль	Конфігураційна ентропія, $S_{Q^n}^c$, Дж/К·моль	
						продукт	відхід
Q^1	Мономер з одним містком кисню, $\text{Si}(\text{OH})_3\text{-O-Si}(\text{OH})_3$.	0	-14	-5	-0,03	6,359	-
Q^2	Димер з O-O	1	-18	-11	-0,03	6,359	-
Q^3	Лінійні ланцюги з O-O-O	2	-33	-18	-0,05	5,540	53,81
Q^4	Повністю зв'язаний тривимірний каркас	3	-41	-25	-0,053	4,312	44,02
Q^5	Полімережа	4	-49	-31	-0,06	3,119	34,24

У таких дослідженнях одна з причин походження відходів проявляється через розуміння їх відношення до змінної ентропії в послідовно трансформуючих квазіполімерних структурах.

Якщо під час утворення нового продукту ентропія системи зменшується і це компенсується виділенням енергії ($\Delta G < 0$), то відбувається реакція її участі в геополімерній структурі. Якщо відповідна фаза термодинамічно стійка сама по собі (наприклад, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), або її участь у полімеризації вимагає додаткового збільшення впорядкованості, яке не компенсується додатковою введеною E_w або модифікованою E_0^w енергією, то такі компоненти не входять до складу полімерного гелю, вони стають відходами (рис. 2). Більш того, з підвищенням температури, при якій технологічно задається застигання матеріалу, ефективність мінімізації таких відходів зростає (рис. 3).

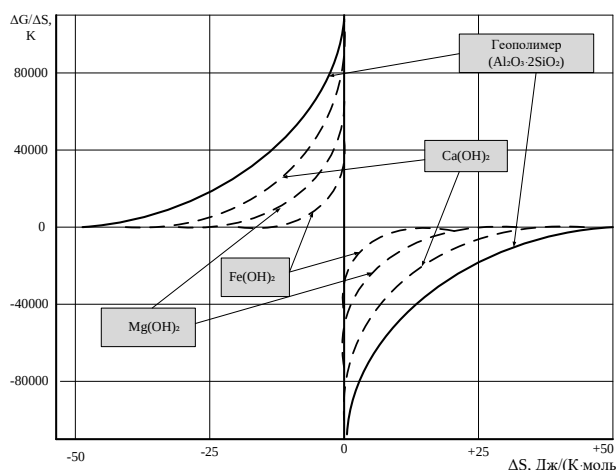


Рис. 2. Графік перемикавання фаз у послідовних структурах як функція зміни енергії Гіббса від зміни ентропії для кожної з таких фаз в порівнянні з ентропії для кожної з цих фаз в порівнянні з товарною продукцією та відходами (Ca, Fe, Mg)

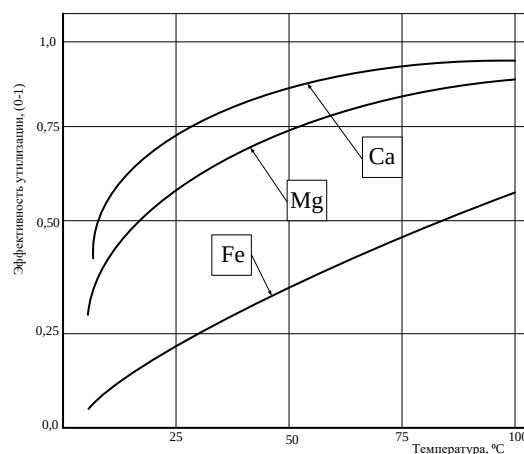


Рис. 3. Графік ефективності утилізації Ca, Mg, Fe при збільшенні температури

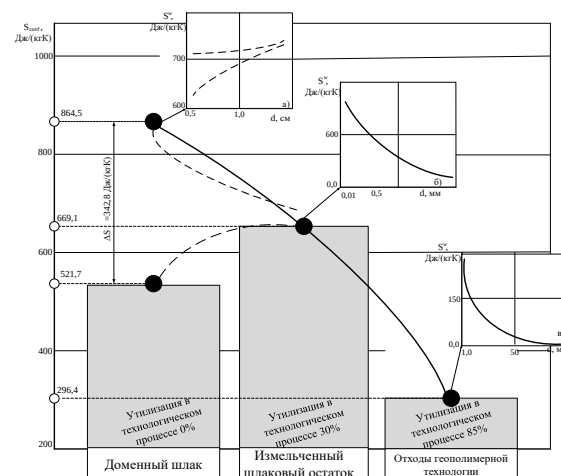


Рис. 4. Вплив фазових структур, фракційного складу системи $[J_{w(i-1)} \rightarrow J_{0(i)}]$ на ступінь утилізації та організованості системи походження промислових відходів в технологіях їх переробки від доменного шлаку до геополімерного виробництва

При механічній обробці шлаку (рис. 4, а) ентропія системи зростає в результаті збільшення дисперсності і числа фаз. Ми маємо зростання безладу, що не може не позначитися на зростанні відпрацьованої частини сировини в даній технології. Чиста механічна переробка шлаку збільшує ентропію відходів в цій технології за рахунок фрагментації та розділення фаз.

Для відходів магнітомеханічної сепарації гранульованого доменного шлаку їх ентропія збільшується майже в 2,8 рази при дробленні від 1 мм до 100 мкм (рис. 4, б). Причому конфігураційна ентропія на два порядки вища, ніж поверхнева ентропія навіть для тонкої фракції.

Максимальна ентропія відходів геополімерної технології (залишки SiO_2 , Al_2O_3 , MgO відноситься до неактивного або частково активованого вигляду); алюмосилікатних гелів (частково аморфних, неструктурованих; катіонів Na^+ , K^+ , залишкових солей, наприклад, Na_2CO_3 , $NaOH$) спостерігається в механічно подрібненій твердій фазі, тобто з високою дисперсністю, аморфізацією, збільшенням числа мікро станів (рис. 4, в). Мінімальна ентропія у статків геополімерної технології: частина речовини впорядковується, фіксується в структурі. Ступінь утилізації зростає обернено пропорційно ентропії, так як при стабілізації компонентів (за рахунок лужної активації) система втрачає свою захащеність і стає більш екологічно безпечною.

В цілому ентропія систем геополімерної переробки доменного шлаку зменшується в міру еволюції структури цього шлаку: від механічного подрібнення до геополімеру зі структурою від Q^1 – (мономер/димер) до Q^4 (3D-каркас), із значеннями, що спадають з 864,5 Дж/(кгК) до 296,4 Дж/(кгК) для 850 кг продукту. Така тенденція відображає зростання структурного порядку за рахунок більш високої послідовної організації кожного наступного відходу.

Такі закономірності демонструють фундаментальний принцип: термодинамічно стабілізовані

відходи легше утилізувати – вони менш схильні до міграції, неконтрольованим реакціям та витокам. Зниження організованості відходів, що регламентується як зростання ентропії, є причиною розвитку процесів утворення відходів в самому рециклінговому технологічному процесі.

Висновки.

1. Полімеризація неорганічних компонентів, як кінцевий технологічний процес рециклінгу доменного шлаку, відбувається в суворій ієрархічній послідовності, а вплив кожної з послідовних структур Q^n на процеси утворення відходів строго регламентується умовами контролю параметрів технологічного процесу.

2. Чим нижча ентропія проміжного квазіполімерного продукту в кінцевому виробництві геополімерних матеріалів $Q^1 \rightarrow Q^5$, тим більше компонентів (Ca, Mg, Fe, Al) може бути включено в нього за умовою деякого додавання енергії.

3. Встановлено, що з підвищенням температури в процесі затвердіння геополімеру збільшується участь компонентів у полімерних структурах, що позитивно впливає на ефективність мінімізації відходів у рамках технологічного процесу рециклінгу (отримання геополімеру).

4. Повторні відходи в технологіях переробки відходів є менш ентропійними по відношенню до основної енергії, а значить, є вкрай проблематичними для подальшої утилізації при мінімумі їх утворення в конкретному технологічному процесі.

5. Методика оцінки ентропії для Q^n -структур в технології геополімеризації дозволила конкретизувати взаємодію між відходоутворюючою системою і навколишнім середовищем, завдяки розумінню ролі термодинамічних рушійних сил в такій технології. Ці результати мають бути певним внеском у розуміння формування алюмосилікатних полімерних мереж і можуть стати напрямком для розробки прогресивних геополімерних композицій як технології переробки доменних шлаків із мінімальним утворенням вторинних відходів.

Список літератури:

1. Shi C., Krivenk P.V., Roy, D. Alkali-Activated Cements and Concretes. 2006, London, Taylor & Francis. pp. 135–182.
2. Glasser F.P., Bhatti I., Osborne G.C. Hydration of Slag Cement. Review in Advances in Cement Research. 12(1). 2000. pp. 1–24.
3. Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., van Deventer J.S.J. The role of inorganic polymer technology in the development of «green concrete» Cement and Concrete Research. 2007. 37(12). pp. 1590–1597.
4. Skane R., Schneider P.A., Jones F., van Riessen A., Jamieson E., Sun X. & Rickard W.D.A. Predicting the stability of geopolymer activator solutions for optimised synthesis through thermodynamic modelling. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 515. 2025. P. 1652–1694.
5. Волошин В. С. Відходи та їх природа. ФОП Семченко, Київ-Маріуполь, 2024. 660 с.

6. Provis J.L., van Deventer, J.S.J. Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications. Cambridge, UK: Woodhead Publishing. 2009. pp. 87–102.

7. Cherotich E., Nthiga E. W., Muthakia G. K., Peterson K. M. Development, synthesis, classification and characterization techniques of geopolymer cement – a review. *Mediterranean Journal of Chemistry*. 2025. 15(2). 140–161.

Voloshyn V.S. WASTE IN METALLURGICAL WASTE RECYCLING TECHNOLOGIES

(on the example of technologies for processing blast furnace slag)

A structural-hierarchical model of the sequential transformation of inorganic components of metallurgical slags into quasi-polymer structures has been developed, in which each previous stage of processing generates wastes that are raw materials for the next stage. Using the example of the technology of geopolymerization of blast furnace slags, the processes of formation of both marketable products and the emergence of new wastes, the type and quality of which are derived from the thermodynamic relations between the waste derived raw materials and the base energy used in this recycling process. Particular attention is paid, in particular, to the role of entropy of intermediate products and temperature conditions in the efficiency of involvement of slag components (Ca, Mg, Fe, Al) in the geopolymer matrix. It has been shown that with the optimal sequence of mixing reagents: $H_2O \rightarrow NaOH \rightarrow Na_2SiO_3$, stability is increased and premature precipitation is prevented, unreacted components are transferred to an active state, thereby minimizing waste Ca, Mg, Fe in geopolymerization technology. Al Reference to thermodynamic indicators in recycling technologies makes it possible to objectively assess the capabilities of such technologies to minimize second-level waste. It is shown that the polymerization of inorganic components, as the final technological process of recycling blast furnace slags, occurs in a strict hierarchical sequence, and the influence of each of the sequential structures on the waste generation processes is strictly regulated by the conditions for controlling the parameters Process. Repeated waste in waste processing technologies is less entropic in relation to base energy, which means that it is highly problematic for further disposal with a minimum of its formation in a particular technological process. It has been established that reducing entropy contributes to deeper processing and minimization of residual recycling waste. The proposed methodology for assessing the entropy characteristics of geopolymer structures allows for a better understanding of the interaction between interrelated technological processes aimed at minimizing industrial waste and the environment, which contributes to the development of low-cost and environmentally sustainable solutions in the processing of blast furnace slag and can be the basis for applying a similar approach for other types of waste. Q"

Key words: recycling, blast furnace slags, geopolymers, geopolymer structure, waste minimization, system entropy, thermodynamic duality.

Дата надходження статті: 16.11.2025

Дата прийняття статті: 03.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 637.5.02

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/24>

Близнюк О.М.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Костюк Т.А.

Комунальний заклад «Харківський ліцей № 24
імені І.Н. Питікова Харківської міської ради»

Василенко І.В.

Комунальний заклад «Харківський ліцей № 24
імені І.Н. Питікова Харківської міської ради»

Воронкін А.А.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Волощук В.В.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Асєєва І.В.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Лебедєв В.В.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ «РОЗУМНИХ» БІОЛОГІЧНО-АКТИВНИХ ГІДРОГЕЛІВ ДЛЯ ЦІЛЬОВОЇ ДОСТАВКИ ЛІКАРСЬКИХ ТА ТЕРАПЕВТИЧНИХ ПРЕПАРАТІВ

Стаття присвячена аналізу сучасного стану розробки «розумних» біологічно активних гідрогелів, які використовуються для цільової доставки лікарських та терапевтичних препаратів. Ці матеріали належать до класу полімерних систем, здатних оборотно реагувати на зміни зовнішніх умов (рН, температура, освітленість, електричне поле, наявність певних хімічних речовин), що робить їх функціональними аналогами біологічних структур. Гідрогелі характеризуються високою біосумісністю, пористою тривимірною структурою та здатністю утримувати до 90% води, що забезпечує оптимальні умови для регенерації тканин, ангіогенезу та доставки активних компонентів. У статті розглянуто класифікацію «розумних» гідрогелів за типом стимулу: термочутливі, рН-чутливі, фото-чутливі, електроактивні та магніточутливі системи. Окрему увагу приділено їхнім фізико-хімічним властивостям, механізмам набухання та фазовим переходам, а також прикладам застосування у фармації, медицині, тканинній інженерії, м'якій робототехніці та екологічних технологіях. Показано, що використання гідрогелів як матриць для контрольованого вивільнення лікарських засобів, зокрема

на основі рослинних екстрактів, відкриває перспективи створення неантибіотичних підходів до лікування ран. Авторі підкреслюють важливість розробки багатофункціональних систем, здатних реагувати на кілька стимулів одночасно, що розширює сферу їхнього застосування та підвищує стабільність у різних умовах. Наведено огляд сучасних досліджень, що демонструють потенціал «розумних» гідрогелів у створенні інноваційних матеріалів для медицини та біотехнологій.

Ключові слова: біологічно-активні, гідрогелі, «розумні», гель-золь, чутливі, властивості, застосування, медицина, фармація.

Постановка проблеми. Сучасні досягнення у області створення полімерів біотехнологічного, фармацевтичного та медичного застосування дозволили розробити так звані «розумні» матеріали [1]. Їх особливість полягає в тому, що вони, за аналогією з живою матерією, здатні сприймати інформацію з навколишнього середовища та змінюватись відповідно до цієї інформації. Серед таких «розумних» матеріалів важливе значення мають біологічно-активні «розумні» гідрогелі, які можуть бути названі системи, які оборотно реагують на зміни властивостей середовища (рН, температура, присутність певних речовин, освітленість, електричне поле) [2]. Прикладами хімічних стимулів для таких біологічно-активних «розумних» гідрогелів є зміни рН, які можуть спричинити набухання або стиснення полімеру, та наявність глюкози, яка може спровокувати вивільнення ліків. Ці полімери розроблені для імітації біологічних систем, що дозволяє контролювати зміни кольору, розчинності та конформації у відповідь на ці хімічні сигнали [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Полімерні гідрогелі на основі «розумних» біологічно активних полімерів – це пористі, добре набухаючі, але нерозчинні у воді, матеріали, які при зміні зовнішніх умов, наприклад, температури, кислотності або хімічного складу середовища здатні змінювати ступінь набухання у воді або навіть переходити у розчинний стан. Набухання є характерною властивістю біологічно-активних «розумних» гідрогелів, яка залежить від різних умов навколишнього середовища, таких як рН і температура.

Біологічно-активні «розумні» гідрогелі можна класифікувати за різними критеріями [1, 2]:

- біологічно-активні «розумні» гідрогелі, що реагують на один стимул. До таких систем відносять термочутливі біологічно-активні «розумні» гідрогелі (Термогелі), рН-чутливі біологічно-активні «розумні» гідрогелі;

- біологічно-активні «розумні» гідрогелі, що реагують на різні стимули: гідрогелі, що реагують на різні подразники, мають кілька переваг порівняно з гідрогелями, що реагують на один подразник [3,4]. Ці біологічно-активні «розумні»

гідрогелі також є більш стабільними та чутливими, зберігаючи функціональність у ширшому діапазоні умов. Вони мають ширшу сферу застосування, включаючи біомедичне використання (наприклад, цільова доставка ліків та тканинна інженерія), м'яку робототехніку, відновлення навколишнього середовища та багатофункціональні сенсори.

Властивості конкретного гідрогелю відіграють вирішальну роль у визначенні його придатності для певного застосування [5]. Однак на ці властивості значною мірою впливають умови навколишнього середовища. У деяких випадках випробування гідрогелю в точних умовах його передбачуваного застосування неможливе. У таких випадках особливо важливо використовувати теоретичні моделі для детального вивчення його властивостей на різні умови.

Постановка завдання. Мета статті – аналіз сучасного стану розвитку «розумних» біологічно-активних гідрогелів для цільової доставки лікарських та терапевтичних препаратів.

Виклад основного матеріалу. Серед різних досліджених носіїв біологічно-активні «розумні» гідрогелі привернули значну увагу завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям та високій біосумісності [4]. Їхня пориста тривимірна структура імітує позаклітинний матрикс природних тканин [5], забезпечуючи ідеальне каркасне середовище для проліферації, міграції та обміну поживними речовинами клітин. Біологічно-активні «розумні» гідрогелі, що складаються на 80–90% з води, підтримують вологе середовище рани, забезпечують проникність кисню та пари, а також сприяють ангіогенезу, ключовим подіям у відновленні тканин. Крім того, вони не прилипають, що мінімізує біль та вторинні пошкодження під час зміни пов'язок [6]. Використання біологічно-активних «розумних» гідрогелів як матриць доставки терапевтичних засобів на рослинній основі є значним прогресом у технології догляду за ранами. Завдяки поєднанню здатності полімерних гідрогелів до контрольованого вивільнення з багатофункціональною біологічною активністю натуральних екстрактів, ці гібридні системи забезпечують неантибіотич-

ний підхід для прискорення загоєння ран. Ця синергетична комбінація створює оптимальне середовище для регенерації тканин, ефективно зменшуючи запалення та інфекцію, пом'якшуючи оксидативний стрес та стимулюючи ангіогенез та відкладення колагену [7].

У багатьох термочутливих полімерів спостерігається зменшення або збільшення розчинності при зміні температури [8]. Термогелі складаються з амфіфільних полімерів, що містять як гідрофільні, так і гідрофобні ділянки, що дозволяє їм здійснювати золь-гель фазовий перехід у відповідь на зміни температури. Це відбувається без потреби в зовнішніх тригерах, наприклад, таких як ферменти, що робить процес екологічно безпечним. Відсутність токсичних зшиваючих агентів підвищує біосумісність термогелів. Застосування термогелів поширюється на різні галузі, включаючи доставку ліків, де вони використовуються для створення систем контрольованого та пролонгованого вивільнення завдяки їхній здатності проходити золь-гель переходи у відповідь на зміни температури. У 3D-культури клітин термогелі забезпечують опорний каркас, який імітує позаклітинний матрикс, сприяючи росту клітин та формуванню тканин [9]. Крім того, в тканинній інженерії ці гідрогелі відіграють вирішальну роль, забезпечуючи біосумісне та ін'єкційне середовище, яке підтримує проліферацію клітин та регенерацію тканин, що робить їх дуже придатними для відновлення та регенерації тканин *in situ* [10].

Біологічно-активні «розумні» гідрогелі, що реагують на зміну хімічних факторів. Такими є рН-чутливі біологічно-активні «розумні» гідрогелі інтенсивно розробляються, причому на їхню поведінку при набуханні та розбуханні впливає кілька факторів [11]. Ці фактори включають іонний заряд, ступінь іонізації, рН навколишнього середовища, тип мономеру, концентрацію полімеру та гідрофільність сіток. Найважливіші екологічні застосування рН-чутливих біологічно-активних «розумних» гідрогелів включають очищення води, контрольоване вивільнення агрохімікатів, екологічне зондування та відновлення ґрунту. Найважливіші біомедичні застосування рН-чутливих біологічно-активних «розумних» гідрогелів включають системи доставки ліків та терапію раку, тканинну інженерію, загоєння ран, біосенсоріку та контрольоване вивільнення терапевтичних агентів [12].

Фоточутливі біологічно-активні «розумні» гідрогелі використовуються для створення динамічних клітинних мікросередовищ, що забезпечують

контрольоване вивільнення ліків, проектування адаптивних поверхонь, розробки м'яких актуаторів та виробництва загоєваних м'яких матеріалів [13].

Електрочутливі, або електроактивні, гідрогелі та наногідрогелі – це особливий клас матеріалів, здатних зазнавати точних просторових змін – розширення або стискання – у відповідь на зовнішнє електричне поле. Ці біологічно-активні «розумні» гідрогелі застосовуються для створення біоміметичних штучних м'язів [13]. Їх швидка та відтворювана активація робить їх безцінними для доставки ліків та біомедичної інженерії.

Магніточутливі біологічно-активні «розумні» гідрогелі – це матеріали з вбудованими магнітними наночастинками, такими як оксид заліза або інші феромагнітні матеріали [13]. Ці наночастинки рівномірно розподіляються в матриці гідрогелю. Під впливом магнітного поля змінюються механічні, структурні або функціональні властивості гідрогелю. Магніточутливі біологічно-активні «розумні» гідрогелі мають широкий спектр застосування в різних галузях, часто для цілеспрямованої доставки ліків. Вони також відіграють певну роль у тканинній інженерії як каркаси з регульованими механічними властивостями, що сприяють росту та диференціації клітин. Крім того, ці біологічно-активні «розумні» гідрогелі використовуються при лікуванні раку. У галузі м'якої робототехніки та актуаторів магніточутливі біологічно-активні «розумні» гідрогелі ідеально підходять для створення пристроїв, які можуть зазнавати оборотних змін форми під дією магнітних подразників, що дозволяє розробляти м'які роботизовані системи, актуатори та штучні м'язи. Вони також застосовуються в сенсорах та діагностичних інструментах, для виготовлення біологічних маркерів. Застосування в довкіллі включає їх використання в системах очищення води та видалення забруднюючих речовин. Їхні магнітні властивості дозволяють легко відокремлювати гідрогель після обробки. Ці гідрогелі використовуються в розробці інтелектуальних матеріалів, таких як чутливі поверхні, настроювані оптичні пристрої та передові покриття.

Висновки. «Розумні» біологічно активні гідро-гелі є перспективними матеріалами для цільової доставки лікарських засобів завдяки їхній здатності реагувати на зовнішні стимули та високій біосумісності. Класифікація гідрогелів за типом стимулу (термо-, рН-, фото-, електро- та магніто-чутливі) дозволяє оптимізувати їх використання у різних галузях – від фармації до м'якої робототехніки. Використання гідрогелів у поєднанні

з рослинними екстрактами забезпечує нові підходи до лікування ран, зменшуючи ризик інфекцій та прискорюючи регенерацію тканин. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення багатостимульних систем з підвищеною стабіль-

ністю та контрольованим вивільненням активних речовин. Розробка теоретичних моделей поведінки гідрогелів у різних умовах є ключовою для прогнозування їх властивостей та розширення практичного застосування.

Список літератури:

1. Samal S. K., Dash M., Dubruel P., Van Vlierberghe S. Smart polymer hydrogels: properties, synthesis and applications. *Smart polymers and their applications*. 2014. P. 237–270.
2. Zheng H., Xing L., Cao Y., Che S. Coordination bonding based pH-responsive drug delivery systems. *Coordination Chemistry Reviews*. 2013. Vol. 257(11-12). P. 1933–1944.
3. Lee S. C., Kwon I. K., Park K. Hydrogels for delivery of bioactive agents: a historical perspective. *Advanced drug delivery reviews*. 2013. Vol. 65(1). P. 17–20.
4. Revete A., Aparicio A., Cisterna B.A., Revete J., Luis L., Ibarra E., Segura González E.A., Molino J., Reginensi D. Ad-765 vancements in the Use of Hydrogels for Regenerative Medicine: Properties and Biomedical Applications. *Int J Biomater*. 2022. Vol. 766. P. 1–16.
5. Kucinska-Lipka J., Gubanska I., Lewandowska A., Terebieniec A., Przybytek A., Cieśliński H. Antibacterial Polyure-768 thanes, Modified with Cinnamaldehyde, as Potential Materials for Fabrication of Wound Dressings. *Polymer Bulletin*. 2019. Vol. 769(76). P. 2725–2742.
6. Lopes A.I., Pintado M.M., Tavaría F.K. Plant-Based Films and Hydrogels for Wound Healing. *Microorganisms*. 2024. Vol. 12(771). P. 438.
7. Lyggitsou G., Barda C., Anagnostou M., Douros A., Statha D., Karampasi C., Papantonaki A.I., Svoliantopoulos I., Sfiniadakis I., Vitsos A.. Wound Healing Potential of Herbal Hydrogel Formulations of Cedrus Brevifolia Extracts in 774 Mice. *Gels*. 2024. Vol. 10. P. 750.
8. Kotsuchibashi Y. Recent advances in multi-temperature-responsive polymeric materials. *Polym. J.* 2020. Vol. 52. P. 681–689.
9. Qiu Y., Park K. Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. *Advanced drug delivery reviews*. 2001. Vol. 53(3)/ P. 321–339.
10. Qiao S., Wang H. Temperature-responsive polymers: synthesis, properties, and biomedical applications. *Nano Res*. 2018. Vol. 11. P. 5400–5423.
11. Kawamura A., Miyata T. pH-Responsive Polymer. *Encycl. Polym. Nanomater*. 2014. P. 1–9.
12. Musarurwa H., Tawanda N. Tavengwa Recent progress in the application of pH-responsive polymers in separation science. *Microchem. J.* 2022. Vol. 179. P. 107503.
13. Mendes P.M. Stimuli-responsive surfaces for bio-applications. *Chem. Soc. Rev.* 2008. Vol. 37. P. 2512.

Bliznyuk O.M., Kostyuk T.A., Vasylenko I.V., Voronkin A.A., Voloshchuk V.V., Asieieva I.V., Lebedev V.V. CURRENT STATUS OF DEVELOPMENT OF “SMART” BIOLOGICALLY ACTIVE HYDROGELS FOR TARGETED DELIVERY OF MEDICINAL AND THERAPEUTIC DRUGS

The article is devoted to the analysis of the current state of development of «smart» biologically active hydrogels, which are used for the targeted delivery of medicinal and therapeutic drugs. These materials belong to the class of polymer systems capable of reversibly responding to changes in external conditions (pH, temperature, illumination, electric field, presence of certain chemicals), which makes them functional analogues of biological structures. Hydrogels are characterized by high biocompatibility, porous three-dimensional structure and ability to retain up to 90% of water, which provides optimal conditions for tissue regeneration, angiogenesis and delivery of active components. The article considers the classification of «smart» hydrogels by type of stimulus: thermosensitive, pH-sensitive, photosensitive, electroactive and magnetosensitive systems. Special attention is paid to their physicochemical properties, swelling mechanisms and phase transitions, as well as examples of applications in pharmacy, medicine, tissue engineering, soft robotics and environmental technologies. It is shown that the use of hydrogels as matrices for the controlled release of drugs, in particular based on plant extracts, opens up prospects for the creation of non-antibiotic approaches to wound treatment. The authors emphasize the importance of developing multifunctional systems capable of responding to several stimuli simultaneously, which expands the scope of their application and increases stability in various conditions. A review of current research demonstrating the potential of «smart» hydrogels in the creation of innovative materials for medicine and biotechnology is presented.

Key words: biologically active, hydrogels, «smart», gel-sol, sensitive, properties, application, medicine, pharmacy.

Дата надходження статті: 19.11.2025

Дата прийняття статті: 08.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Бровін О.Ю.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Коваленко Ю.І.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Лещенко С.А.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Дерібо С.Г.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Чорна Н.А.

Інститут енергетичних машин і систем імені А.М. Підгорного
Національної академії наук України

АНОДНА ПОВЕДІНКА МАГНІЮ І ЙОГО СПЛАВІВ У РОЗЧИНІ ХЛОРИДІВ

Попри високий енергетичний потенціал та унікальні фізико-механічні властивості, ефективність використання магнію у системах протекторного захисту і хімічних джерелах струму часто обмежується його схильністю до швидкого саморозчинення. В роботі досліджено кінетику анодного розчинення чистого магнію та його сплавів: промислового сплаву МА2-1 (система Mg-Al-Zn-Mn) та експериментального сплаву МС (система Mg-Pb із вмістом свинцю 2–3%) у хлоридних розчинах. Аналіз потенціодинамічних досліджень дозволив встановити суттєві відмінності в анодній поведінці досліджуваних матеріалів. Доведено, що сплав МА2-1 демонструє найвищу швидкість корозії. Натомість сплав МС (Mg-Pb) продемонстрував найнижчу швидкість саморозчинення, що в 1,9 рази менше порівняно зі сплавом МА2-1. Цей ефект досягається завдяки присутності свинцю, на якому перенапряга виділення водню значно вища, що призводить до гальмування катодної водневої реакції. Аналіз результатів гальванодинамічних досліджень виявив наявність трьох характерних ділянок зміни потенціалу, які відображають стадійність анодного процесу. Спочатку відбувається різке зміщення потенціалу в позитивну область, пов'язане з формуванням поверхневої плівки $\text{Mg}(\text{OH})_2$ внаслідок адсорбції хлорид-іонів та утворення пересиченого розчину MgCl_2 в приелектродному шарі. Далі відбувається зміщення потенціалу в бік негативних значень, що відповідає руйнуванню пасивної плівки та активації поверхні з інтенсивним утворенням водню. На третій ділянці відбувається інтенсивне анодне розчинення при компромісному потенціалі. Встановлено, що для сплаву МС стрибки потенціалу на першій стадії є меншими, а залежність $\Delta E - \lg j$ має лінійний характер, що свідчить про зміну лімітуючої стадії процесу під впливом свинцю. Розрахунковий коефіцієнт Тафеля $b > 0,4$ для всіх зразків магнію і його сплавів вказує на складний кінетичний контроль, що включає хімічні та дифузійні стадії. Результати побудови корозійних діаграм підтвердили, що легування магнію є свинцем ефективним методом зниження швидкості саморозчинення у хлоридних середовищах.

Ключові слова: магній, анодний матеріал, анодне розчинення, саморозчинення, поляризаційні дослідження.

Постановка проблеми. Магній у чистому вигляді і у складі сплавів застосовується як конструкційний матеріал для авіа-, автомобіле- та суднобудування, анодний матеріал для систем електрохімічного протекторного захисту від корозії і у складі електродів резервних хімічних джерел струму. Сплави магнію мають комплекс корисних фізико-механічних властивостей, але, в багатьох середовищах, досить швидко кородують [1]. Поширені промислові сплави магнію з алюмінієм, цинком і марганцем демонструють нерівномірність розчинення і високу швидкість саморозчинення завдяки негативному диференц-ефекту (Negative Difference Effect, NDE) [2].

Такі особливості поведінки заважають реалізації великого енергетичного потенціалу магнію і його сплавів як анодних матеріалів. Через виражений NDE сплави магнію у хлоридних розчинах розчиняються струмом лише на 25-40%, а 75-60% втрачаються через саморозчинення і дезінтеграцію. Ці самі явища заважають ефективному використанню магнію у складі електродних матеріалів хімічних джерел струму. Навіть за сприятливих умов розряду гальванічного елементу коефіцієнт використання магнію не перевищує 0,65. Для вирішення таких проблем потрібні нові анодні матеріали на основі магнію, які дозволять зменшити швидкість саморозчинення зі збереженням електрохімічної активності. Саморозчинення магнію складається з двох суміщених процесів, а саме: розчинення магнію і відновлення води до водню. Тому перспективним шляхом гальмування саморозчинення є введення у склад магнієвих сплавів металевих компонентів з підвищеною перенапругою відповідної водневої реакції, наприклад, свинцю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальні дослідження анодної поведінки магнію і його сплавів у сольових розчинах впродовж останніх десятиріч продовжуються у контексті матеріалів електродів для протекторного захисту і резервних джерел струму. Хлоридні розчини є агресивними для магнію через високу хімічну активність чистого металу і його сплавів. За останні роки опубліковано низку досліджень, що вивчають механізми анодних процесів, роль поверхневих плівок і вплив електролітів. Дослідження анодного розчинення магнію в хлоридних середовищах часто пов'язують з NDE.

У роботі [3] було досліджено формування анодної поверхневої плівки на магнії. Встановлено, що зі зростанням потенціалу плівка товщає, стає більш пористою і зменшує опір. Анодне утворення

водню (Anodic Hydrogen Evolution, AHE) зростає при потенціалах вище рівноважного для водню, що свідчить про AHE на поверхні металу у порах плівки. AHE відбувається через окиснення Mg до Mg^+ і реакцію з водою. За високих потенціалів (-0,2 В) AHE призводить до розриву поверхневої плівки і прискорення корозійного процесу.

У дослідженні [4] проаналізовано розчинення Mg у фосфатних і хлоридних електролітах. У хлоридних розчинах зареєстровано агресивний вплив хлоридів, що призводять до локального руйнування поверхневої плівки. Автори роботи [5] досліджували AHE в умовах безперервного збільшення площі свіжої металевої поверхні, створеного шляхом абразивного механічного впливу на поверхню і хімічного впливу розчинів $NaCl$ під час анодної поляризації. Встановлено, що водень на магнієвому аноді утворюється в результаті прямої хімічної реакції між відкритим Mg і електролітом.

У сульфатних розчинах корозійні процеси менш агресивні, ніж у хлоридних. Автори дослідження за допомогою електрохімічних методів [6] встановили вплив pH середовища і концентрації сульфат-іонів на корозійні властивості магнію і магнієвого сплаву ZE41. Більша концентрація сульфату при кожному значенні pH і більш низькі значення pH при кожній концентрації сульфату призводили до збільшення швидкості корозії. На стійкість сплавів магнію у сульфатних розчинах також впливає легування. У роботі [7] досліджено корозію та корозійну втому легованих сплавів у сульфатних розчинах. Встановлено, що легування Zn , Ca , Sn покращує пасивацію, зменшуючи анодне розчинення. У дослідженні [8] спостерігався такий саме вплив домішок Ca і Zn на анодний процес.

Нажаль, системні дослідження добавок свинцю на анодну поведінку магнієвих сплавів у літературі майже відсутні.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження кінетики анодного розчинення магнію і його сплавів MA2-1 та MC (вміст Pb від 2 до 3%) в хлоридних розчинах.

Виклад основного матеріалу. Анодні процеси досліджувались за характером зміни швидкості розчинення магнієвих електродів шляхом зміни потенціалу або густини струму, тобто потенціодинамічними і гальванодинамічними поляризаційними методами в розчинах $NaCl$.

Для загальної характеристики анодного процесу в хлоридних розчинах були отримані потенціодинамічні поляризаційні залежності в розчині $NaCl$ 0,17 моль/дм³ на зразках чистого магнію,

конструкційного сплаву МА2-1, який використовується для виготовлення протекторів, і сплаву МС. На підставі досліджень було побудовано поляризаційні діаграми зображені на рис. 1. Катодні графіки поляризаційної діаграми характеризують залежність зміни струму від потенціалу. Чистий магній має фізично і хімічно однорідну поверхню. Хід анодної залежності на магнії відповідає зміщенню потенціалу від стаціонарного в позитивну сторону з одночасним збільшенням швидкості розчинення. При потенціалі $E = -1.09$ В струм корозії магнію становить $8 \cdot 10^{-3}$ А/см².

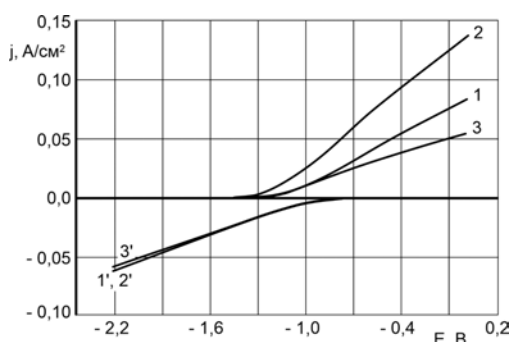


Рис. 1. Поляризаційна діаграма для магнію (1,1'), сплаву МА2-1 (2,2') і сплаву МС (3,3') при швидкості зміни потенціалу 0,01 В/с у розчині NaCl 0,17 моль/дм³

Поверхня сплаву МА2-1, який містить до 5% алюмінію і до 1,5% цинку, є фізично і хімічно неоднорідною. Результати аналізу анодних залежностей для сплаву МА2-1 свідчать про збільшення швидкості розчинення зі зростанням анодної поляризації. Струм корозії в цьому випадку становить $11,5 \cdot 10^{-3}$ А/см² за потенціалу -1.17 В. Суттєвий струм корозії сплаву МА2-1 в хлоридному розчині з'являється за більш негативних потенціалів, ніж у чистого магнію. Збільшення швидкості корозії на цьому сплаві в 1,4 рази можна пояснити діяльністю локальних гальванічних елементів Mg-Zn і Mg-Al, де цинк і алюміній вико-

нують функції катодів. Водень утворюється не тільки на Al і Zn, але й на поверхні кородуючого Mg. Також до виникнення локального струму призводить встановлення різних змішаних потенціалів через різні перенапруги на кристалографічно різних поверхнях.

Сплав МС має дрібнокристалічну структуру, а його поверхня демонструє тільки хімічну неоднорідність. Аналіз анодних залежностей на сплаві МС при зміщенні потенціалів в позитивну область свідчить про зростання швидкості розчинення, але в меншій мірі, ніж для сплаву МА2-1. Струм корозії для сплаву МС становить $6 \cdot 10^{-3}$ А/см² за потенціалу -1.04 В. Це в 1,9 рази менше в порівнянні зі швидкістю корозії сплаву МА2-1. Більш повільне розчинення, можливо, зумовлено виникненням локальних гальванічних елементів Mg-Pb, на катодних ділянках яких спостерігається суттєво більша перенапряга виділення водню, а корозія магнію відбувається з водневою поляризацією.

Для дослідження особливостей перебігу анодного процесу в хлоридних розчинах були виконані гальванодинамічні поляризаційні дослідження в хлоридному розчині на зразках чистого магнію, сплаву МА2-1 і МС. Графічна інтерпретація результатів анодних гальванодинамічних вимірювань наведені на рис. 2.

На чистому магнії (рис. 2а) залежно від швидкості зростання густини струму зміна потенціалу має три виражені ділянки. Перша ділянка фіксується в інтервалі густини струму від 0 до 0,005 А/см² і її тривалість визначається швидкістю розгортки струму. Ця ділянка характеризується різким зміщенням потенціалу в позитивну область. Залежно від швидкості зміни струму зміна потенціалу становить від 0,271 В (при $1 \cdot 10^{-4}$ А/с) до 1,6 В (при $1 \cdot 10^{-2}$ А/с). Таке різке зміщення потенціалу обумовлено утворенням пересиченого розчину $Mg(OH)_2$ в дифузійному приелектродному шарі, тобто перебігом реакцій:

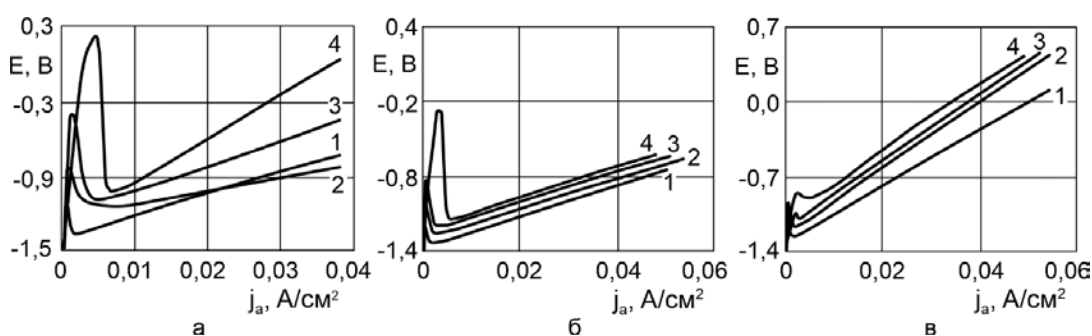
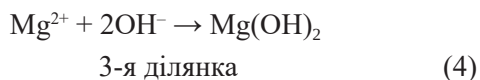
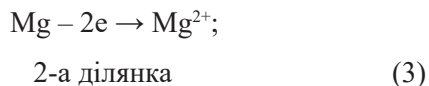
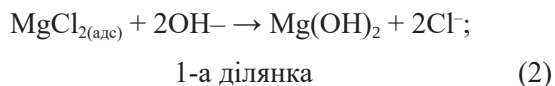
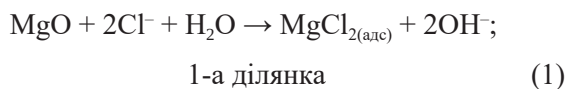


Рис. 2. Анодні гальванодинамічні поляризаційні залежності у розчині 0,17 моль/дм³ NaCl на магнії (а), сплаві МА2-1 (б) і сплаві МС (в) при швидкості зміни струму, А/с: 1 – $1 \cdot 10^{-4}$; 2 – $1 \cdot 10^{-3}$; 3 – $2 \cdot 10^{-3}$; 4 – $1 \cdot 10^{-2}$



Поверхневий шар оксиду магнію адсорбує аніони Cl^- і вони витісняють адсорбований кисень і гідроксильні аніони, утворюючи шар MgCl_2 . У відповідності до адсорбційної теорії анодного розчинення адсорбовані іони Cl^- сприяють виходу іонів магнію з кристалічної решітки. Залежно від концентрації іонів-адсорбентів у дифузійному прианодному шарі накопичуються іони магнію з утворенням хлориду магнію.

Розчинність $\text{Mg}(\text{OH})_2$ невелика і становить $8.4 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ і його новоутворений шар гальмує подальший вихід іонів магнію в електроліт. З видаленням з поверхні магнію кисню і гідроксильних іонів прискорюється хімічна реакція взаємодії магнію з водою, якій відповідає 2-га ділянка графіків. На ній спостерігається зміщення потенціалу електрода в негативну область до величин від -1,04 до -1,32 В, залежно від швидкості зміни струму. На цій ділянці відбувається руйнування шару $\text{Mg}(\text{OH})_2$, яке супроводжується утворенням гідратованих іонів магнію і розчиненням оксидної плівки на магнієвій поверхні. На активній поверхні магнію виникає короткозамкнений гальванічний елемент магній-вода. В підсумку, на поверхні електрода одночасно відбувається анодне розчинення магнію і катодне відновлення води до водню:



На третій ділянці відбувається рівномірне зміщення потенціалу в позитивний бік, яке супроводжується електрохімічним і хімічним розчиненням магнію з утворенням водню. Реакції електрохімічного і хімічного розчинення магнію є конкуруючими. Співвідношення швидкостей зазначених реакцій визначає компромісний потенціал розчинення магнію. Зі збільшенням густини струму, компромісний потенціал стає більш позитивним.

Магнієвий сплав МА2-1, що містить у своєму складі алюміній, цинк і марганець, при анодному розчиненні має такі ж області, як анодні залежності на чистому магнії. З ходу графіків на рис. 2б

можна зробити висновок, що добавки впливають на характер розчинення. Стрибки потенціалів у першій області виражені в меншій мірі і становлять 0,36; 0,6; 0,68 і 1,22 В для відповідних швидкостей зміни струму. На другій ділянці анодних поляризаційних залежностей зміщення потенціалу в негативну область відбувається до приблизно таких же значень, як і для чистого магнію. Третя ділянка графіків характеризується меншою швидкістю зміщення потенціалу в позитивну область порівняно з аналогічними графіками для чистого магнію.

На зразках сплаву МС загальний вигляд анодних гальванодинамічних залежностей не змінюється (рис. 2в) і зберігаються три ділянки. На першій ділянці стрибки потенціалу набагато менші в порівнянні з рис. 2а і рис. 2б, причому ΔE_a зменшується зі збільшенням швидкості зміни струму у порівнянні з чистим магнієм і сплавом МА2-1. Зсув потенціалу становить 0,44; 0,48; 0,59 і 0,71 В для відповідних швидкостей. На другій ділянці графіків зміщення потенціалу в негативну сторону незначне. Такі відмінності в ході залежностей, можливо, зумовлені суттєво меншою швидкістю утворення $\text{Mg}(\text{OH})_2$ в приелектродному шарі і на поверхні електрода, або утворенням шару з гіршими захисними властивостями, який легше руйнується при подальшому збільшенні струму. Третя ділянка характеризується більшим нахилом поляризаційних залежностей у порівнянні з чистим магнієм і сплавом МА2-1. Відмінність у нахилах обумовлена присутністю в сплаві цинку і свинцю, який істотно змінює кристалічну решітку сплаву. Під час анодної поляризації сплаву МА2-1 крім розчинення магнію паралельно відбувається розчинення алюмінію і цинку. Слід зазначити, що швидкість розчинення магнію і його сплавів при збільшенні швидкості зміни струму знижується. Це явище можна пояснити утрудненою дифузією продуктів реакції.

Тривалість 1-ї та 2-ї ділянок анодних гальванодинамічних залежностей для магнію та його сплавів зменшується в ряду чистий магній > сплав МА2-1 > сплав МС. Це пояснюється різною швидкістю утворення та руйнування гідроксиду магнію.

Для визначення стадії, що лімітує процес анодного розчинення, було виконано аналітичну обробку першої ділянки залежностей анодного розчинення магнію та його сплавів (рис. 2) у координатах електрохімічної кінетики у розчині NaCl . На рис. 3 наведено інтерпретацію першої області поляризаційних графіків, яка демонструє відсутність чіткого переходу в прямолінійну залеж-

ність на чистому магнії. Для сплаву МА2-1 ця залежність трохи вирівнюється, а для сплаву МС залежність $\Delta E - \lg j$ має лінійний характер і для мінімальної і для максимальної швидкості зміни струму. Швидкість окиснення чистого магнію зазвичай визначається електрохімічною перенапругою, але з графічної інтерпретації першої області поляризаційних залежностей можна зробити висновок про вплив на швидкість окиснення хімічної реакції утворення гідроксиду, що блокує вихід іонів магнію з кристалічної решітки. Слід зазначити, що практично на всіх графіках немає чітких прямолінійних ділянок, окрім 2-х графіків для сплаву МС. Відсутність прямолінійності пояснюється складними процесами анодного розчинення за участю компонентів сплаву. Лінійний характер залежностей $\Delta E - \lg j$ для сплаву МС обумовлений переважним впливом свинцю, який забезпечує найбільшу перенапругу утворення водню в порівнянні з іншими компонентами сплаву. Розрахунковий коефіцієнт b рівняння Тафеля для всіх графіків становить понад 0,4, що свідчить про значний вплив хімічної та дифузійної стадій на сумарну електродну реакцію.

Використовуючи методику оцінки швидкості самочинних процесів, було виконано побудову корозійних діаграм на досліджуваних сплавах у хлоридних розчинах. Струм корозії для чистого магнію (рис. 4) в хлоридному розчині при швидкості зміни струму $1 \cdot 10^{-2}$ А/с становить величину $8,2 \cdot 10^{-3}$ А/см² і ця величина майже повністю збігається зі значенням струму, отриманого при аналізі потенціодинамічних залежностей (рис. 1). Струм корозії для чистого магнію за швидкості зміни струму $1 \cdot 10^{-4}$ А/с становить $11 \cdot 10^{-3}$ А/см².

Найнижча швидкість зміни струму $1 \cdot 10^{-4}$ А/с наближається до стаціонарних умов. Збільшення струму корозії в стаціонарних умовах пояснюється присутністю в приелектродному шарі суттєвої концентрації активуючих аніонів Cl^- . Вони утворюють на поверхні металу адсорбований комплекс, який легко втрачає зв'язок з основною масою поверхні і переходить в розчин. Також аніон Cl^- частково нейтралізує пасивуючу дію кисню і гідроксильних аніонів, адсорбційно витісняючи їх з поверхні металу. В результаті відбувається оголення поверхні і виникає гальванічний короткозамкнутий елемент магній – вода. Тобто

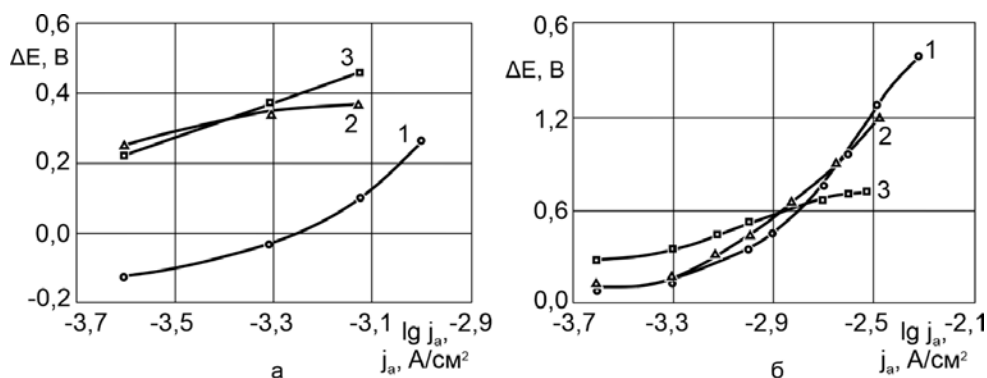


Рис. 3. Інтерпретація 1-ї ділянки гальванодинамічних залежностей (рис. 2) в координатах електрохімічної кінетики для розчину NaCl 0,17 моль/дм³ при швидкостях зміни струму $1 \cdot 10^{-4}$ А/с (а) і $1 \cdot 10^{-2}$ А/с (б) для чистого магнію (1), сплаву МА2-1 (2) і сплаву МС (3)

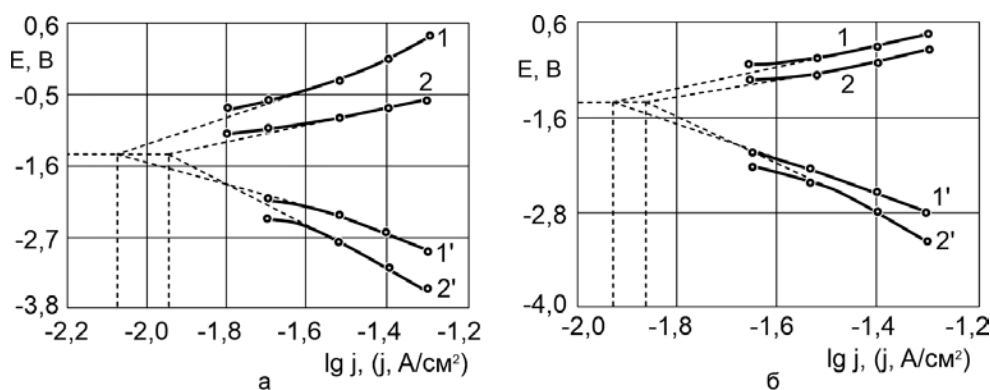
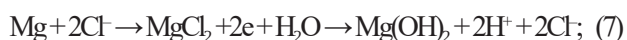
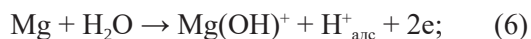


Рис. 4. Корозійна діаграма для чистого магнію (а) і сплаву МА2-1 (б) в розчині NaCl 0,17 моль/дм³ при швидкості зміни струму, А/с: 1,1' - $1 \cdot 10^{-2}$; 2,2' - $1 \cdot 10^{-4}$

на електроді одночасно з розрядом відбувається і саморозряд магнію. На активній поверхні відбуваються наступні реакції:



Для сплаву МС (рис. 5) величини струмів корозії нижчі, ніж для чистого магнію і сплаву МА2-1 (рис. 4) за обох швидкостей зміни струму. Для швидкості $1 \cdot 10^{-2}$ А/с струм корозії встановлено на рівні $6,4 \cdot 10^{-3}$ А/см², а для $1 \cdot 10^{-4}$ А/с – $8,5 \cdot 10^{-3}$ А/см². Зниження швидкості корозії сплаву МС у порівнянні з чистим магнієм і сплавом МА2-1 можна пояснити присутністю свинцю, на якому перенапряга виділення водню більша, ніж на інших компонентах сплаву, а корозія магнію відбувається з переважним катодним контролем з водневою деполаризацією.

Для сплаву МС різниця в струмах корозії при різних швидкостях зміни струму приблизно така ж, як і для сплаву МА2-1, але менша, ніж для чистого магнію. Це можна пояснити особливістю переносу заряджених часток і сполук у дифузійному приелектродному шарі. Зміна швидкості поляризації неминуче призводить до зміни електричного поля в цій зоні, що впливає на загальну швидкість електродної реакції.

Величини струмів корозії для сплаву МА2-1 найбільші в порівнянні з чистим магнієм і спла-

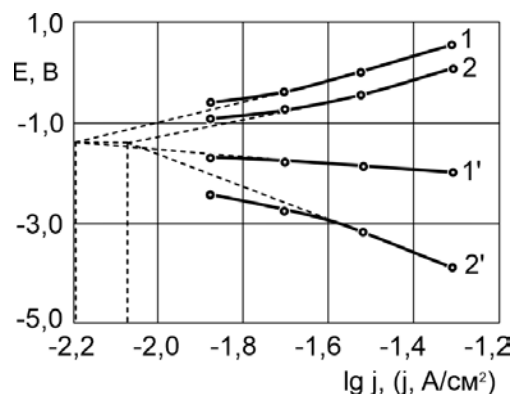


Рис. 5. Корозійна діаграма для сплаву МС в розчині NaCl 0,17 моль/дм³ при швидкості зміни струму, А/с: 1,1' - $1 \cdot 10^{-2}$; 2,2' - $1 \cdot 10^{-4}$

ву МС для обох швидкостей зміни струму. Для швидкості $1 \cdot 10^{-2}$ А/с струм корозії встановлено на рівні $11,9 \cdot 10^{-3}$ А/см², для $1 \cdot 10^{-4}$ А/с – $13 \cdot 10^{-3}$ А/см². Це пояснюється роботою локальних гальванічних елементів Mg-Al і Mg-Zn на поверхні сплаву.

Висновки. Вивчено анодну поведінку магнію та його сплавів (МА2-1 і МС) у розчині NaCl 0,17 моль/дм³ при швидкості зміни потенціалу $1 \cdot 10^{-2}$ В/с і швидкості зміни струму, А/с: $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $2 \cdot 10^{-3}$ і $1 \cdot 10^{-2}$. Встановлено, що для магнієвого сплаву зі свинцем швидкість анодного розчинення менша порівняно зі сплавом МА2-1. Струм корозії для сплаву МС менший порівняно з чистим магнієм і сплавом МА2-1 при всіх досліджених швидкостях зміни потенціалу і струму.

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. URL: <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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.069>
3. Song G.L., Unocic K. A. The anodic surface film and hydrogen evolution on Mg. *Corrosion Science*. 2015. Vol. 98. P. 758–765. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.05.047>
4. Mg Dissolution in Phosphate and Chloride Electrolytes: Insight into the Mechanism of the Negative Difference Effect / S. Lebouil et al. *CORROSION*. 2015. Vol. 71, no. 2. P. 234–241. URL: <https://doi.org/10.5006/1459>
5. 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.069>
6. Dinodi N., Nityananda Shetty A. Investigation of influence of medium ph and sulfate ion concentrations on corrosion behavior of magnesium alloy ZE41. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. Vol. 50, no. 2. P. 149–156. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068375514020112>
7. Song G. L. Corrosion electrochemistry of magnesium (Mg) and its alloys. *Corrosion of Magnesium Alloys*. 2011. P. 3–65. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857091413.1.3>
8. Corrosion Behavior in Magnesium-Based Alloys for Biomedical Applications / L. Xu et al. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 2613. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15072613>

Brovin O.Yu., Kovalenko Yu.I., Leshchenko S.A., Deribo S.G., Chorna N.A. ANODIC BEHAVIOR OF MAGNESIUM AND MAGNESIUM ALLOYS IN CHLORIDE SOLUTIONS

Despite its high energy potential and unique physical and mechanical properties, the effectiveness of magnesium in protective systems and chemical current sources is often limited by its tendency to rapidly dissolve. The work investigates the kinetics of anodic dissolution of pure magnesium and its alloys: industrial alloy MA2-1 (Mg-Al-Zn-Mn system) and experimental alloy MC (Mg-Pb system with 2–3% lead content) in chloride solutions. Analysis of potentiodynamic studies revealed significant differences in the anodic behavior of the studied materials. It was proven that the MA2-1 alloy exhibits the highest corrosion rate. In contrast, the MS alloy (Mg-Pb) demonstrated the lowest self-dissolution rate, which is 1.9 times lower than that of the MA2-1 alloy. This effect is achieved due to the presence of lead, on which the hydrogen evolution overpotential is significantly higher, leading to inhibition of the cathodic hydrogen reaction. Analysis of the results of galvanodynamic studies revealed the presence of three characteristic areas of potential change, which reflect the stages of the anodic process. First, there is a sharp shift in potential to the positive region, associated with the formation of a $Mg(OH)_2$ surface film due to the adsorption of chloride ions and the formation of a supersaturated $MgCl_2$ solution in the pre-electrode layer. Next, there is a shift in potential towards negative values, corresponding to the destruction of the passive film and activation of the surface with intense hydrogen formation. In the third area, intense anodic dissolution occurs at a compromise potential. It has been established that for the MS alloy, the potential jumps in the first stage are smaller, and the dependence $\Delta E - \lg j$ is linear, which indicates a change in the limiting stage of the process under the influence of lead. The calculated Tafel coefficient $b > 0.4$ for all samples of magnesium and its alloys indicates complex kinetic control, including chemical and diffusion stages. The results of constructing corrosion diagrams confirmed that magnesium alloying with lead is an effective method for reducing the rate of self-dissolution in chloride environments.

Key words: magnesium, anode material, anodic dissolution, self-dissolution, polarization studies.

Дата надходження статті: 20.11.2025

Дата прийняття статті: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 667.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/26>**Кузьмінський В.Ю.**

Український державний університет науки і технологій

Варлан К.Є.

Український державний університет науки і технологій

Суворова Ю.О.

Компанія «ВІКО»

Черваков О.В.

Український державний університет науки і технологій

Черваков Д.О.

Український державний університет науки і технологій

МОДИФІКАЦІЯ АЛКІДНИХ СМОЛ ЕСТЕРАМИ ПОЛІАСПАРГІНОВИХ КИСЛОТ

У роботі досліджено вплив бутилового естеру поліаспарагінової кислоти (БЕПАК) як модифікатора на фізико-хімічні та експлуатаційні властивості алкідної смоли Serkyd FA27X60. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю удосконалення алкідних плівкоутворювачів з метою підвищення їх антикорозійної стійкості, твердості та технологічних характеристик без істотного ускладнення виробництва. БЕПАК, отриманий реакцією приєднання дібутилмалеїнату та діетилентріаміну, характеризується наявністю вторинних аміногруп, здатних до утворення водневих зв'язків з компонентами смоли, що забезпечує його ефективну інтеграцію у полімерну матрицю. Експериментально встановлено, що введення 1–5% БЕПАК не порушує гомогенність системи та не викликає фазового розшарування. Збільшення концентрації модифікатора супроводжується зростанням в'язкості, що свідчить про його роль як загусника та регулятора реологічних властивостей. Оптимальна кількість добавки становить 1%, за якої спостерігається підвищення твердості плівки на 6–8%, блиску до 97%, а також формування цільної структури покриття з високим ступенем зшивання (89,7–92%). Покриття з таким вмістом модифікатора демонструє найкращі антикорозійні властивості при випробуванні в 5%-му розчині NaCl, тоді як перевищення концентрації БЕПАК призводить до зниження структурної регулярності плівки та часткового вимивання надлишку модифікатора. Отримані результати свідчать, що БЕПАК може виконувати функції багатофункціональної добавки до алкідних плівкоутворювачів – загусника, регулятора технологічних характеристик та антикорозійного компонента. Визначено перспективність подальшого дослідження механізмів взаємодії БЕПАК з алкідною смолою для оптимізації рецептури лакофарбових матеріалів нового покоління з підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей.

Ключові слова: антикорозійний захист, бутиловий естер поліаспарагінової кислоти (БЕПАК), регулятор реологічних властивостей, алкідна смола Serkyd FA27X60, регулятор технологічних властивостей, оптимальна концентрація, відносна твердість, час формування покриття.

Постановка проблеми. З розвитком хімічної промисловості спостерігається розширення асортименту модифікуючих добавок для плівкоутворювачів, зокрема на основі алкідних смол, найбільш поширених для отримання декоративних і захисних покриттів різноманітного призначення. Одним з основних вирішуваних при цьому

завдань є підвищення рівня експлуатаційних властивостей покриттів: фізико-механічних, антикорозійних тощо.

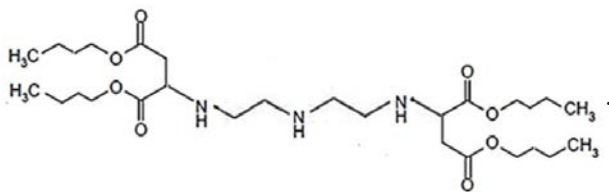
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проводяться інтенсивні дослідження, спрямовані на використання нетрадиційної, у тому числі олійної сировини та олеохімічних похідних для синтезу

алкідних плівкоутворювачів [1]. На ринку лакофарбових матеріалів з'явилась низка поліуретаналкідних плівкоутворювачів, що отримують модифікацію алкідних смол ізоціанатами в процесі їх синтезу [2-5], та які мають достатньо високий рівень фізико-механічних властивостей. Також мають місце спроби модифікації алкідних смол доступними низьковартісними продуктами, зокрема нафтополімерними смолами [6], для здешевлення плівкоутворювача для отримання покриттів із задовільним рівнем експлуатаційних властивостей.

Постановка завдання. Метою даної роботи було визначення перспективності застосування БЕПАК – продукту взаємодії дібутилмалеїнату (ДБМ) з діетилентріаміном (ДЕТА) як модифікатора властивостей алкідного лаку Serkyd FA27X60, а також визначення комплексу фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей покриттів на основі модифікованого лаку.

Якісні показники лаку Serkyd FA27X60 наведено в табл. 1.

Виклад основного матеріалу. Естери поліаспарагінових кислот зазвичай синтезують реакцією приєднання Міхаєля за участю відповідного алкілового естеру малеїнової кислоти та первинних амінів [7]. Синтезований в роботі БЕПАК має таку структурну формулу:



Його було отримано за мольного співвідношення ДБМ : ДЕТА 2,1 : 1 та умов, наведе-

них в [8]. В FT-IR-спектрі отриманого продукту (рис. 1) є характерні смуги поглинання, cm^{-1} : 2959 ($-\text{CH}_3$ ($-\text{CH}_2-$)); 2874, 1469 ($-\text{CH}_2-$); 1369 ($\text{C}-\text{N}$); 1154 ($-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$); 1045 ($-\text{O}-\text{C}-\text{C}-$); 774 ($\text{N}-\text{H}$).

БЕПАК – в'язка прозора світло-жовта рідина, добре сумісна з алкідними смолами. Наявність в структурі вторинних аміногруп вказує на можливість використання його у складі алкідних смол як структуруючого компонента (за рахунок утворення водневих зв'язків з алкідами та наповнювачами), а також як антикорозійної добавки.

Дослідні зразки готували додаванням до алкідної смоли марки Serkyd FA27X60 продукту БЕПАК у кількості 1%, 3% та 5%. Суміщення проводили при температурі 20°C та неперервному перемішуванні. Смоли суміщалися легко, утворюючи однорідні прозорі системи без осаду або піни. При зберіганні протягом 6 місяців не відбувалося розшаровування, помутніння, або утворення осаду. До лаку Serkyd FA27X60 та його модифікованих складів додавали сикатив у кількості до 1% від загальної маси смоли. Приготовані таким чином композиції наносили напиленням. Товщина сухих покриттів, яку визначали згідно ISO 2808, складала 60 мкм.

Час висихання лакового покриття, блиск і твердість сформованих плівок визначали на склі для фотографічних платівок розміром $90 \times 120 \times 2$ мм. Вимірювання блиску покриттів виконували відповідно до ISO 2813 під кутом 60° за допомогою глосметру марки YG60S. Твердість покриття визначали згідно стандарту ISO 1522 (ДСТУ ISO 1522:2015) за температури 20°C за допомогою маятника Кенінга.

Стійкість покриттів до статичного впливу 5%-го водного розчину хлориду натрію випробували

Таблиця 1

Якісні показники алкідної смоли марки Serkyd FA27X60 (Туреччина)

№ з/п	Найменування показника	Вимоги у відповідності до технічних характеристик	Фактичні показники
1	Колір за йодометричною шкалою, $\text{mg I}_2/100 \text{ cm}^3$, не більш	5	5
2	Зовнішній вигляд	Прозорий, допускається незначна опалесценція	Прозорий
3	Чистота лаку	Допускається наявність одиничних механічних включень не більш 10 од.	Відповідає
4	Умовна в'язкість при температурі $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ по візкозиметру ВЗ-246 з діаметром сопла 6 мм, с	100-200	140
5	Масова доля нелетких речовин, мас. %	57-62	60,5
6	Кислотне число, mg KOH/g , не більш	12	12
7	Твердість плівки лаку покриття за маятниковим приладом типу ТМЛ (маятник А), ум.од., не менш: – через 24 год	0,15	0,17
9	Час висихання при температурі $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ до ступеня 3, ч, не більш	6	1,5
10	Еластичність плівки покриття на згін, мм, не більш	1	1

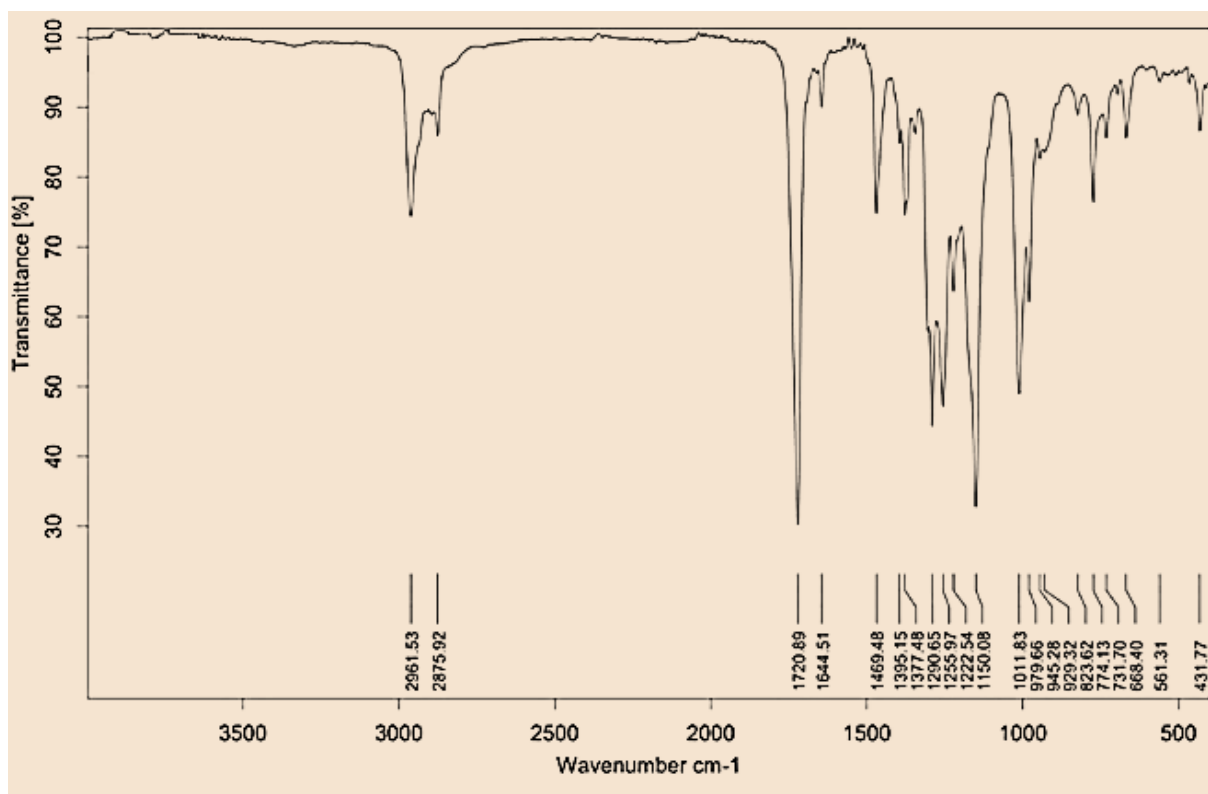


Рис. 1. FT-IR спектр продукту реакції ДБМ і ДЕТА

на пластинках з листової холоднокатаної сталі 08КП з розмірами (150×150×2) мм. Адгезію лакових покриттів до сталі визначали на пластинах з листової холоднокатаної сталі 08КП з розмірами (90×120) мм і товщиною 0,8-1,0 мм. Металеві пластини перед нанесенням лакових покриттів зачищали шліфувальною шкіркою, витримували в хлоридній кислоті, знежирювали і підсушували в ексікаторі.

Еластичність покриття визначали на пластинках прямокутної форми з алюмінієвих листів або алюмінієвих стрічок довжиною 100-150 мм, шириною 20-50 мм і товщиною 0,25-0,32 мм.

Реологічні властивості дослідних складів визначали згідно ISO 3219 (ASTM D2196) за температури 20°C з використанням віскозиметра Брукфільда MYR V1-062 виробництва ОНАУС.

Час формування покриття визначали згідно ISO 9117-3 (ДСТУ ISO 9117-3:2009) методом «відбитого пальця» (touch dry test).

Еластичність покриття вимірювали за ISO 1519 методом згину на циліндрі, та за ISO 6860 методом кінцевого згину.

Визначення гель-фракції сухого покриття проводили згідно ASTM D2765.

Корозійну стійкість дослідних покриттів оцінювали методом нейтрального сольового туману за

ISO 9227. Перед випробуванням стійкості до статичного впливу 5%-го водного розчину хлориду натрію пластини з нанесеним покриттям кондиціювали протягом двох тижнів за стандартних умов згідно з ISO 3270: (23 ± 2)°C та відносної вологості (60 ± 5)%. За цим пластини з покриттями занурювали у модельне середовище, залишаючи край нанесеного покриття на відстані 10 мм вище дзеркала рідини. Зразки із середовищем поміщали на 21 добу в кліматичну камеру із встановленими температурою 28°C та відотною вологістю (60 ± 5)%.

Реологічні дослідження зразків смоли Serkyd FA27X60, модифікованої БЕПАК, виявили збільшення її в'язкості із збільшенням кількості доданого БЕПАК (рис. 2).

На підставі наведеної на рис. 2 залежності можна зробити висновок, що БЕПАК в дослідних композиціях проявляє властивості загусника або структуруючої добавки. При цьому ефект збільшення в'язкості має суттєвий прояв вже при додаванні 1-3% модифікатора. Враховуючи особливості структури БЕПАК, можна припустити, що ефект загущення є результатом утворення водневих зв'язків за участю вторинних аміногруп модифікатора і карбонільних та естерних груп алкідної смоли.

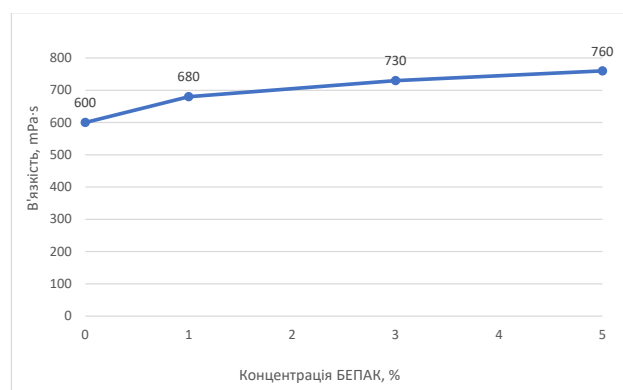


Рис. 2. Залежність в'язкості алкідної смоли Serkyd FA27X від концентрації доданого БЕПАК за температури 21,4°C

Реограми дослідних зразків (рис. 3) вказують на те, що вихідна алкідна смола Serkyd FA27X та її модифіковані БЕПАК варіанти є типовими псевдопластичними рідинами, в яких опір плинності змінюється симбатно до зміни вмісту БЕПАК в алкідній смолі. Отримані закономірності дозволяють розглядати добавки типу БЕПАК як потенційні регулятори технологічних властивостей алкідних лакофарбових систем.

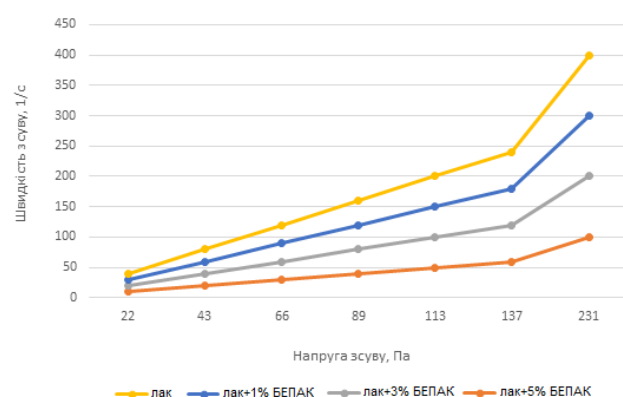


Рис. 3. Реограми алкідної смоли Serkyd FA27X60 з різним вмістом БЕПАК при температурі 21,4°C

Дослідження впливу БЕПАК на швидкість формування та властивості лакових покриттів на основі алкідної смоли Serkyd FA27X60 виявили наступне. Додавання БЕПАК до алкідної смоли Serkyd FA27X60 призводить до збільшення часу формування плівки покриття (рис. 4). Критичним є введення до 5% БЕПАК: за цієї концентрації час формування покриття при кімнатній температурі становить 26 годин.

Залежність твердості лакових покриттів від вмісту модифікатора для різних термінів формування (витримки до випробування) наведено на рис. 5.

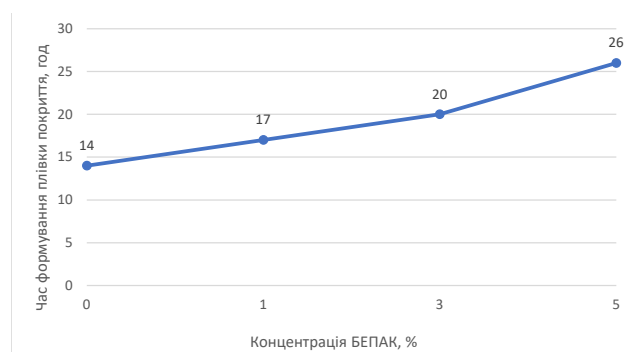


Рис. 4. Залежність часу формування покриття на основі алкідної смоли Serkyd FA27X60 від вмісту БЕПАК

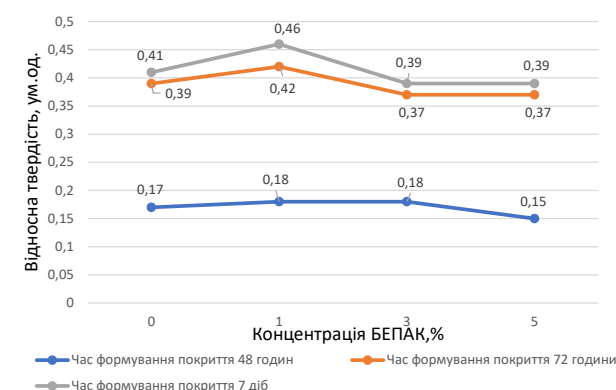


Рис. 5. Залежність твердості лакових покриттів на основі алкідної смоли Serkyd FA27X60 від вмісту БЕПАК і часу витримки до випробування

Залежності, наведені на рис. 4 та рис. 5 показують, що оптимальний вміст БЕПАК в алкідній смолі дорівнює 1%. Такий міст модифікатора за несуттєвого збільшення часу формування (до 17 годин) сприяє помітному збільшенню твердості покриттів через 48 та 72 годин (відповідно на 6% та 8%) порівняно із немодифікованою алкідною смолою. Разом з тим, за цього вмісту БЕПАК досягається максимальне значення показника блиску – 97% через 7 діб кондиціонування зразка при кімнатній температурі (рис. 6). Слід також зазначити, що додавання БЕПАК не впливає на еластичність покриттів, яка для вихідної смоли Serkyd FA27X60 та її модифікованих складів має однакове значення 1 мм (табл. 2).

Порівняльні характеристики немодифікованої алкідної смоли Serkyd FA27X60 та модифікованої БЕПАК наведено в табл. 2.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що склад на основі алкідної смоли Serkyd FA27X60 з модифікатором БЕПАК за всіма розглянутими показниками практично не поступається або перевищує склад без модифікатора. Введення модифі-

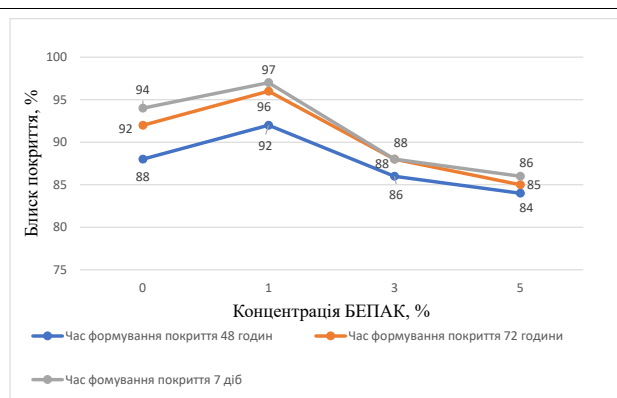


Рис. 6. Залежність показника блиску лакових покриттів на основі Serkyd FA27X60 від вмісту БЕПАК та часу витримки покриття до випробування

катора амінного типу сприяє збільшенню вмісту гель-фракції сформованих покриттів. При цьому за вмісту БЕПАК 1% лакове покриття проявляє антикорозійні властивості в умовах дії 5%-го водного розчину хлориду натрію (рис. 7).

По зображеннях зразків після випробування видно, що під шаром покриття з 1% БЕПАК, порівняно з іншими покриттями, майже відсутні сліди точкової корозії, пухирці та відшарування на ділянках, що перебували над і під дзеркалом розчину. Такий ефект можна пояснити тим, що 1% БЕПАК є оптимальним для максимально повного задіяння активних центрів алкідної смоли і модифікатора в процесі формування щільної та упорядкованої структури плівки, яка ефективно перешкоджає проникненню молекул соляного розчину в покриття. Вірогідно в процесі формування покриття БЕПАК приймає участь в реакції зшивання алкідного плівкоутворювача. Збільшення вмісту модифікатора в алкідній смолі погіршує щільність і регулярність структури, а надлишок БЕПАК, не задіяного в цьому процесі, можливо, частково вимивається при контакті з водним середовищем. Це збільшує проникність покриття для корозійного середовища, що призводить до зниження антикорозійних властивостей покриттів з 3% та 5% модифікатора. На користь

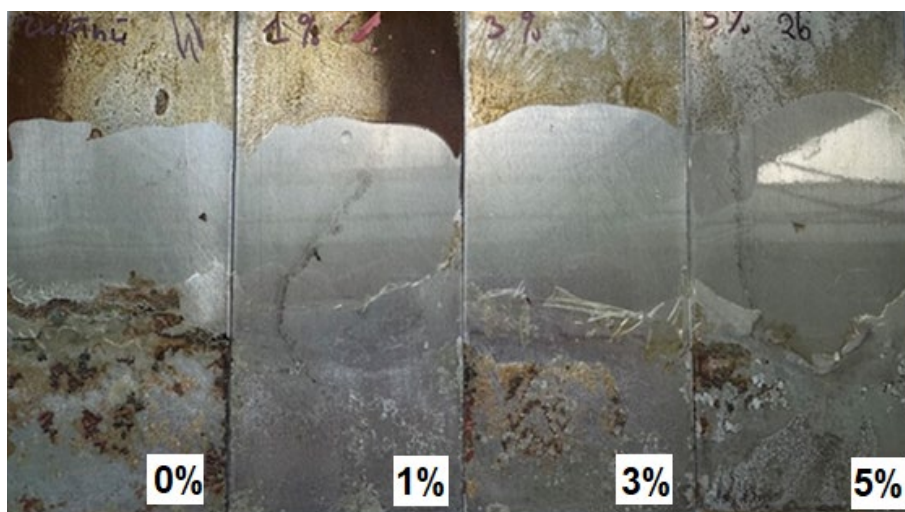


Рис. 7. Зовнішній вигляд металевих пластинок з лаковим покриттям на основі алкідної смоли Serkyd FA27X60 з різним вмістом БЕПАК, після витримання у 5% розчині NaCl протягом 21 доби

Таблиця 2

Декоративні та фізико-хімічні властивості досліджених покриттів

№	Найменування показника	Лак без модифікатора	Модифікований лак, що містить БЕПАК		
			1%	3%	5%
1	Блиск, %, через 72 години	92	96	88	85
2	Відносна твердість, у. о., через 72 години	0,39	0,42	0,37	0,37
3	Еластичність (вигин), мм	1	1	1	1
4	Час формування покриття до ступеня 3, год	14	17	20	26
5	Вміст гель-фракції, %	88,0	92,0	90,0	86,0
	в ксилолі	87,0	91,3	89,2	85,4
	бутилацетаті	84,3	89,7	87,5	84,3

такого припущення свідчать результати випробувань покриттів на вміст гель-фракції, який є вищим саме для зразка з 1% БЕПАК.

Але визначення механізмів взаємодії БЕПАК із алкідною смолою, антикорозійної дії БЕПАК у складі алкідних плівкоутворювачів та залежності її від його концентрації тощо потребує додаткових досліджень із залученням сучасних методів.

Висновки. Результати проведених досліджень показали, що бутиловий естер поліаспаргінової

кислоти у складі алкідних плівкоутворювачів проявляє себе як модифікатор багатоцільового призначення: загусник, регулятор реологічних властивостей та антикорозійна добавка. Оптимальний вміст БЕПАК у складі алкідної смоли Serkyd FA27X60 складає 1%, який забезпечує отримання покриттів з високим показником відносної твердості – 0,46 у. о., блиском 97%. При такій концентрації формуються покриття зі ступенем зшивання 89,7–92% і хорошою захисною властивістю в умовах дії 5%-го водного розчину NaCl.

Список літератури:

1. Chervakov O. V., Chervakov D. O., Sukhyi K. M., Kuzminskiy V. Yu., Varlan K. Ye., Belyanovskaya E. A., Levchenko Ye. P., Yurchik M. S. Oleochemical products in synthesis technologies of eco-friendly polymers. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. Vol. 32. No. 4. P. 969–992. DOI: 10.15421/jchemtech.v32i4.309194.
2. Linga J. S., Mohammed I. A., Ghazali A., Khairuddean M. Novel poly(alkyd-urethane)s from vegetable oils : Synthesis and properties. *Industrial Crops and Products*. 2014. Vol. 52. P. 74–84. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.10.002.
3. Polyurethane-modified alkyd : US Patent / Harris R. R., Pollack W. J. № 4116902 ; опубл. 23.09.1978, Бюл. № 27.
4. Villada Y., Inciarte H., Gomez C., Cardona S., Orozco L. M., Estenoz D., Rios L. Alkyd-urethane resins based on castor oil : Synthesis, characterization and coating properties. *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 180. Art. No. 107556. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107556.
5. Civan Çavuşoğlu F., Acar I. Urethane-modified alkyd resin-based paint production: determination of paint properties. *Konya Journal of Engineering Sciences*. 2025. Vol. 13. No. 1. P. 307–320. DOI: 10.36306/konjes.1586565.
6. Бондарева Є. О., Пушкарьов Ю. М., Куншенко Б. В. Вивчення впливу нафтополімерної смоли на властивості алкідних покриттів. *Труди Одеського політехнічного університету*. 2008. Вип. 30. Ч. 2. С. 234–237.
7. Yang X., Deng Y., Li P., Guo K., Zhao Q. Ester exchange modification for surface-drying time control and property enhancement of polyaspartate ester-based polyurea. *Coatings*. 2025. Vol. 15. Art. No. 244. DOI: 10.3390/coatings15020244.
8. Liu X., Zheng T. The synthesis of a polyaspartic acid ester and development of the coatings. *Advanced Materials Research*. 2014. Vols 875–877. P. 165–170. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.165.

Kuzminskiy V.Yu., Varlan K.Ye., Suvorova Yu.O., Chervakov O.V., Chervakov D.O. MODIFICATION OF ALKYD RESINS WITH POLYASPARAGINIC ACID ESTERS

This study investigates the effect of polyaspartic acid butyl ester (BEPAK) as a modifier on the physicochemical and performance properties of the alkyd resin Serkyd FA27X60. The research relevance lies in improving alkyd film-forming materials to enhance their corrosion resistance, hardness, and processing behavior without significantly complicating production technology. BEPAK, synthesized via the Michael addition of dibutyl maleate and diethylenetriamine, contains secondary amino groups capable of forming hydrogen bonds with resin components, enabling efficient integration into the polymer matrix. Experimental results show that adding 1–5% BEPAK does not disturb system homogeneity or cause phase separation. Increasing BEPAK content leads to higher viscosity, confirming its function as a thickener and rheology regulator. The optimal modifier concentration was determined to be 1%, resulting in increased coating hardness by 6–8%, gloss up to 97%, and formation of a dense, highly crosslinked film structure (89.7–92%). Coatings with 1% BEPAK demonstrated superior corrosion resistance when exposed to a 5% NaCl aqueous solution, whereas higher modifier contents reduced structural regularity and led to partial leaching of unbound BEPAK. The results indicate that BEPAK acts as a multifunctional additive in alkyd systems—serving as a thickener, processability regulator, and anticorrosive component. Further research is recommended to clarify the mechanisms of BEPAK–alkyd resin interaction and optimize formulations for next-generation coating materials with improved operational performance.

Key words: corrosion protection, polyaspartic acid butyl ester (BEPAK), rheology modifier, Serkyd FA27X60 alkyd resin, processing modifier, optimum concentration, relative hardness, coating formation time.

Дата надходження статті: 11.10.2025

Дата прийняття статті: 07.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 621.357.7
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/27>

Лещенко С.А.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Бровін О.Ю.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Дерібо С.Г.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Мулявка Д.О.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОСТАДІЙНОГО ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЧОРНИХ ГІБРИДНИХ КОНВЕРСІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ

У роботі проведено дослідження різноманітних процесів одержання конверсійних покриттів на сталевих деталях. Представлено коротку характеристику традиційних вітчизняних процесів, в тому числі термічного оксидування, гарячого лужного оксидування, чорного фосфатування в цинкфосфатних ваннах та формування оксидно-фосфатних плівок із кислих розчинів. Представлено інформацію про деякі сучасні процеси чорного оксидування сталі від провідних зарубіжних виробників переважно на основі відповідних патентів, технічних паспортів і сертифікатів безпеки. Особливу увагу приділено опису процесів одержання чорних гібридних конверсійних покриттів на сталі, а також процесу «холодного оксидування». В результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено оптимальні склади робочих розчинів та технологічні режими, що забезпечують формування двостадійного чорного гібридного конверсійного покриття на сталевих виробах. Здійснено підбір компонентів для утворення первинного дикарбоксилатного шару та наступного чорного оксидного покриття, а також визначено температурні умови та тривалість обробки, які забезпечують одержання щільного, однорідного, стійкого до стирання та обсіпання покриття. На першій стадії у розчині, що містить (г/дм³): щавлеву кислоту – 15, натрію м-нітробензолсульфонат – 5, калій-натрій виннокислий – 0,5 при 18–25 °С впродовж 5 хв отримують дикарбоксилатне покриття, а на другій стадії у розчині, що містить (г/дм³): NaOH – 100, NaNO₃ – 35, NaNO₂ – 5, Na₂S₂O₃ – 5, Na₂MoO₄ – 5, SnCl₂ – 0,2, лаурилсульфат натрію – 0,04, при 75–80 °С впродовж 15 хв отримують чорне оксидне покриття. Отримані результати дозволяють реалізувати промислове застосування двостадійного процесу для підвищення антикорозійних і експлуатаційних характеристик сталевих деталей.

Ключові слова: конверсійні покриття, чорне гібридне оксидування, дикарбоксилатний шар, холодне оксидування, чорне оксидне покриття, сталеві вироби, антикорозійний захист, робочі розчини, технологічні режими.

Постановка проблеми. Конверсійні покриття знайшли широке застосування при обробці чорних металів завдяки поєднанню корозійностійких, функціональних та декоративних властивостей. Вони характеризуються високою адсорбційною здатністю, електроізоляційними та гідрофобними властивостями. Мікропориста структура оксидного шару сприяє утриманню мастил, знижує

коефіцієнт тертя та забезпечує краще припасування мікронерівностей поверхонь тертя. Незначна товщина сформованого шару конверсійного покриття дозволяє застосовувати його для точних деталей без порушення посадкових розмірів. Одержання конверсійних покриттів на сталевих виробах сприяє підвищенню їх експлуатаційних характеристик у машинобудуванні, приладобу-

дуванні, інструментальному виробництві та військово-технічній сфері.

Чорні конверсійні покриття займають особливе місце серед різноманітних методів хімічної та електрохімічної обробки поверхні сталевих виробів, оскільки окрім функціональних переваг, вони зменшують відбивну здатність поверхні, формуючи однорідний матово-чорний зовнішній вигляд, що є важливим для оптичних, вимірювальних та тактичних приладів. Комплекс зазначених властивостей зумовлює зростаючий інтерес до технологій чорного оксидування та необхідність удосконалення умов процесу з метою забезпечення відтворюваної якості покриття.

Вдосконалення традиційних технологічних розчинів та впровадження нових інноваційних процесів відбувається з метою універсалізації, зменшення собівартості, вдосконалення і спрощення технологічності процесу, покращення корозійної стійкості, зовнішнього вигляду, функціональних властивостей, відтворюваності результатів. Тому дослідження процесів формування чорних конверсійних покриттів на сталі, впливу складу робочих розчинів та параметрів обробки на структуру й властивості отриманого шару, встановлення оптимальних режимів промислового застосування є актуальним завданням на сьогоднішній день.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що у вітчизняній практиці найпоширенішими методами одержання чорних конверсійних покриттів на сталях є термічне оксидування, гаряче лужне оксидування, чорне фосфатування в цинкфосфатних ваннах та формування оксидно-фосфатних плівок із кислих розчинів [1–3].

Термічне оксидування, яке проводять на повітрі, в маслах або розплавах солей, потребує підвищених температур (250–470 °C і більше), що робить цей процес енергоємним і небезпечним.

Гаряче лужне оксидування також характеризується високою температурою (125–155 °C) та використанням концентрованих лугів і окисників (NaOH, NaNO₂, NaNO₃), що створює ризик хімічних опіків і небезпеку викиду гарячого розчину при контакті з вологою.

Аналіз вітчизняних джерел показує розбіжність між описаними технологіями конверсійних покриттів і сучасними продуктами, що пропонуються на українському ринку; інформація про деякі актуальні процеси у вітчизняній літературі є обмеженою. Лише останнім часом в Україні почали застосовувати методи двостадійного гібридного оксидування [4,5] та «холодного

оксидування» [6], однак нестача відомостей про їх механізми та особливості зумовлює потребу у проведенні їх досліджень.

Провідні американські виробники пропонують в Україні кілька сучасних процесів чорного оксидування сталі.

1. Гаряче оксидування при 140–145 °C (EPi) є аналогом традиційного лужного процесу на основі NaOH, NaNO₂ та NaNO₃, але містить додатковий компонент – етилендіосечовину [7].

2. Оксидування при 105–115 °C дає змогу уникнути утворення їдкої киплячої пари, покращити безпеку та зменшити енергоспоживання. Процес здійснюється у розчині [8,9], що містить основні солі (NaOH, NaNO₂, NaNO₃) і спеціальні добавки – активатори, каталізатори, пенетранти та змочувачі (їх склад не розголошується).

3. Двостадійне гібридне оксидування при 82–88 °C [10–11] або 93–99 °C [12,13] є безпечнішим, оскільки температура нижча за точку кипіння води. Покриття складається з двох шарів: спочатку формується проміжне дикарбоксилатне покриття в розчині щавлевої кислоти, а потім – шар магнетиту Fe₃O₄ у розчині на основі NaOH, NaNO₂, NaNO₃ з додатковими прискорювачами, ректифікаторами та пенетрантами.

4. «Холодне оксидування» (18–30 °C) є популярним через простоту, хоча процес також двостадійний і за суттю не є оксидуванням: на поверхні формується шар купрум-селеніду. На першій стадії утворюється дикарбоксилатне покриття в розчині щавлевої кислоти (у документації [14] – «активація»). На другій – чорне покриття формується у розчині, що містить сполуку міді, а також селенову, ортофосфатну та нітратну кислоти [15,16]. Основним недоліком методу є висока вартість і токсичність селенових сполук, тому його подальше дослідження було відхилено.

Компанія *Birchwood Laboratories, Inc.* має низку патентів щодо оксидування сталі [4,5,17], термін дії яких завершився, проте наведені в них відомості залишаються цінними.

Патент US 6,695,931 B2 [4] описує формування ультратонкого чорного гібридного конверсійного покриття шляхом послідовного нанесення двох шарів. Спочатку створюють проміжне дикарбоксилатне покриття в розчинах аліфатичних дикарбонових кислот (щавлевої, маленової, бурштинової, винної або їх сумішей) з добавками, що виконують функції рафінувальників зерна або прискорювачів. Це покриття має щільну кристалічну структуру та формує поверхню, багату на молекулярне залізо й кисень. Далі проводять

«фарбування» у нагрітому (50–105 °C) окислювальному розчині $\text{NaOH-NaNO}_3\text{-NaNO}_2$, який реагує з проміжним шаром і утворює покриття магнетитом Fe_3O_4 . Щільність проміжного шару забезпечує отримання дрібнокристалічного та стійкого до стирання кінцевого покриття.

Патент US 6,899,956 B2 [5] описує вдосконалення двостадійного процесу формування хімічного конверсійного покриття на чорних металах. На першому етапі нанесення дикарбоксилатного шару покращено за рахунок введення прискорювача (гідроксиламіну або органічних/неорганічних нітросполук) і змочувального агента. На другому етапі окислення ефект підвищено додаванням хелатора (для пом'якшення води) та прискорювача.

У патенті US 5,723,183 [17] наведено склад і метод створення конверсійного покриття з оксалату або інших дикарбоксилатів заліза з подальшим «фарбуванням» водорозчинним барвником. Спочатку покриття формують у розчині дикарбонової кислоти (щавлевої, малонової, бурштинової, лимонної або винної) з додаванням прискорювача (хлорату, молібдату, сульфиду чи нітросполуки). Потім наносять барвник, який зв'язується з Fe(II) у матриці дикарбоксилату, утворюючи водонерозчинний і стабільний пігмент.

Усі зазначені процеси можуть бути інтегровані у виробничі умови, сприяючи зниженню витрат на обробку, скороченню тривалості операцій, а також підвищенню продуктивності та якості продукції. Водночас вибір найбільш економічно доцільного й безпечного технологічного маршруту залишається складним інженерним завданням.

Варто підкреслити, що жоден із технологічних процесів формування конверсійних захисно-декоративних покриттів на сталевих виробках (зокрема окисдування та фосфатування) не забезпечує достатнього рівня корозійного захисту за жорстких або навіть помірних умов експлуатації. У зв'язку з цим на завершальному етапі оброблення необхідним є застосування додаткових захисних заходів – гідрофобізація поверхні в кремнійорганічних рідинах, пасивація у відповідних розчинах або просочення мінеральними чи консистентними мастилами.

Таким чином, саме фінішна стадія обробки визначає кінцевий рівень антикорозійної ефективності та формує зовнішній вигляд покриття. Тип і концентрація використовуваного засобу впливають на оптичні характеристики, товщину захисної плівки, час висихання та корозійну стійкість сформованого покриття.

Постановка завдання. Мета дослідження: експериментально визначити оптимальні склади робочих розчинів і технологічні режими, що забезпечують двостадійне формування чорних гібридних конверсійних покриттів на сталевих виробках, та оцінити вплив параметрів процесу на структуру, однорідність, адгезію і експлуатаційні властивості покриття.

Виклад основного матеріалу дослідження. Перед нанесенням покриття сталеві деталі піддавалися механічному шліфуванню до забезпечення шорсткості не нижче 7-го класу, хімічному знежиренню в лужному розчині при 60 °C протягом 5–10 хв та хімічному травленню за кімнатної температури протягом 5 хв у розчині складу (г/дм³): HCl – 300–350, інгібітор Pickle Pal – 10 мл/л.

Однорідність покриття, наявність плям, відшарування, великих пор і дефектів оцінювали візуально та під мікроскопом при кратності 50–400×. Адгезію оксидного шару (цілісність та опір відшаруванню) визначали методом перехресних надрізів із подальшим контролем ступеня відшарування відповідно до ISO 2409.

Дослідження процесу формування гібридного конверсійного покриття проводили шляхом підбору складу робочих розчинів та режимів процесів для отримання первинного дикарбоксилатного шару та наступного чорного оксидного покриття.

Для формування первинного шару гібридного покриття в якості основного компоненту розчину було випробувано щавлеву, бурштинову, винну кислоти та їх суміші в різних концентраціях. Перший етап окиснення мав забезпечити утворення активної поверхні, що дозволяло застосовувати на наступному етапі менш агресивні розчини з низьким окислювальним потенціалом, зменшивши концентрацію агресивних компонентів, робочу температуру та тривалість обробки.

Очікувалося, що суміш щавлевої і винної кислот сприятиме формуванню більш щільної мікрокристалічної структури, проте практично не вдалося підібрати оптимальне співвідношення компонентів. Найкращі результати було отримано з використанням щавлевої кислоти, однак утворене покриття мало надто крупнокристалічну структуру. Для зменшення розміру кристалів до розчину додавали модифікатори (згідно з рекомендаціями [4]): калій-натрій виннокислий, цитрат, молібдат, триполіфосфат та тіоціанат натрію. Найбільш ефективним виявився калій-натрій виннокислий.

Для прискорення процесу застосовували органічні та неорганічні нітросполуки, а також цитрат,

молібдат, триполіфосфат, тіоціанат, хлорат та сульфід натрію. Позитивний ефект спостерігався при використанні нітробензойної кислоти, особливо – натрію м-нітробензолсульфонату.

В результаті серії експериментів щільне дрібнокристалічне дикарбоксилатне покриття було отримано при температурі 18–25 °С протягом 5 хв у розчині складу (г/дм³): щавлева кислота – 15, натрію м-нітробензолсульфонат – 5, калій-натрій виннокислий – 0,5.

Експериментально встановлено, що у разі зниження активності розчину після тривалої експлуатації швидкість процесу можна тимчасово збільшити підвищенням температури до 30–40 °С. Проте більш ефективним заходом є коригування складу розчину шляхом додавання свіжого концентрату до відпрацьованої технологічної ванни.

У процесі експлуатації в розчині утворюється жовтий осад, ідентифікований як оксалат заліза. Наявність осаду незначно впливає на працездатність розчину, проте його рекомендується періодично відфільтровувати.

Після активації деталі слід ретельно промити холодною проточною водою (15–25 °С), а безпосередньо перед наступним етапом обробки – у дистильованій воді, що мінімізує забруднення розчину сторонніми речовинами.

Підбір розчину для оксидування. Наступним етапом було визначено задачу отримання щільного, однорідного чорного покриття, стійкого до стирання та обсіпання, при температурі не вище 80 °С. В якості базового розчину було обрано суміш з наступним співвідношенням компонентів (г/дм³): NaOH – 100, NaNO₃ – 35, NaNO₂ – 5.

Спочатку проводили експерименти з додаванням різних речовин у ролі прискорювачів та хелаторів.

– Прискорювачі: натрію м-нітробензолсульфонат, нітробензойна кислота, цитрат, молібдат, триполіфосфат, тіоціанат, ванадат, вольфрамат, біхромат, станнат, хлорат, сульфід натрію, хлорид олова(II), хлорид олова(IV) (концентрація 0,05–0,5 г/дм³).

– Хелатори металів: тіосульфат, молібдат, сульфід, тіоціанат, глюконат натрію, трилон Б (концентрація 1–10 г/дм³).

– Поверхнево-активна речовина (змочувач): лаурилсульфат натрію (0,04–0,1 г/дм³).

Найбільш ефективним виявилося додавання 5 г/дм³ тіосульфату натрію, 5 г/дм³ молібдату натрію та 0,2 г/дм³ хлориду олова(II).

Після визначення оптимальних добавок виконано серію експериментів із варіюванням кон-

центрацій основних компонентів у межах (г/дм³): NaOH – 25–200, NaNO₃ – 10–70, NaNO₂ – 1–10. Виявлено, що швидкість процесу оксидування значною мірою залежить від вмісту NaOH. Було отримано залежність тривалості чорного оксидування від температури при концентрації NaOH 50–200 г/дм³, що наведена на рис. 1.

Аналіз отриманої залежності дозволив зробити висновок про доцільність проведення оксидування при температурі 75–80 °С (оптимально – 80 °С) та вмісті NaOH 100–150 г/дм³ (оптимально – 100 г/дм³).

Експериментальні дослідження [18] підтвердили можливість отримання щільного однорідного чорного покриття, стійкого до стирання та обсіпання, при температурі 75–80 °С протягом 15 хв при використанні розчину складу (г/дм³): NaOH – 100, NaNO₃ – 35, NaNO₂ – 5, Na₂S₂O₃ – 5, Na₂MoO₄ – 5, SnCl₂ – 0,2, лаурилсульфат натрію – 0,04.

Оскільки захисні властивості оксидних покриттів на сталі є низькими, поверхня після оксидування потребує додаткової обробки для надання антикорозійного ефекту. Серед сучасних методів широко застосовують обробку у водорозчинних антикорозійних засобах, що містять емульгатори та інгібітори корозії, яка може визначатися як гідрофобізація, ущільнення, наповнення або просочення.

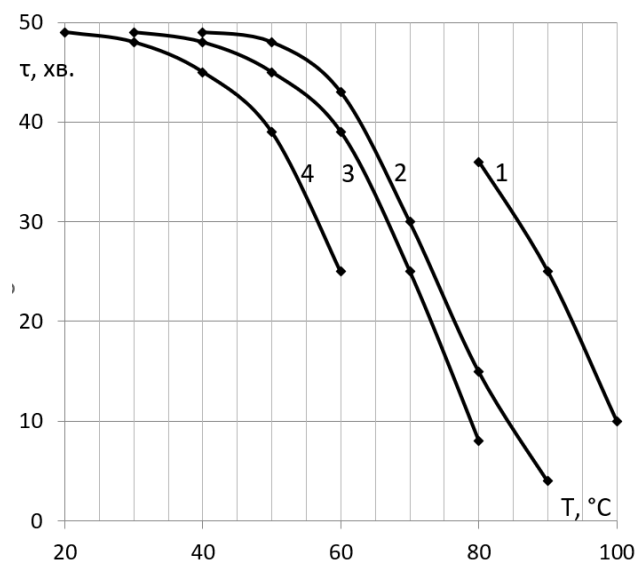


Рис. 1. Залежність тривалості чорного оксидування від температури при вмісті NaOH (г/дм³): 1 – 50, 2 – 100, 3 – 150, 4 – 200

У даному дослідженні успішно застосовано антикорозійний засіб *Dri-Touch Amber IRP2*, основу якого складає глибоко гідроочищений важкий нафтовий дистилат із наступним складом (% об.): барій алкілнафталенсульфат – 1–5,

монометилловий ефір пропіленгліколю – 1–5 [19]. Після нанесення на металеву поверхню засіб швидко проникає у поглиблені ділянки, витісняє поверхневу вологу та формує самовідновлювану захисну плівку товщиною близько 2,5 мкм, що забезпечує високу стійкість до атмосферної вологості та корозії.

Висновки. В результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено оптимальні склади робочих розчинів та технологічні режими, що забезпечують формування двостадій-

ного чорного гібридного конверсійного покриття на сталевих виробках. Здійснено підбір компонентів для утворення первинного дикарбоксилатного шару та наступного чорного оксидного покриття, а також визначено температурні умови та тривалість обробки, які забезпечують одержання щільного, однорідного, стійкого до стирання та обси- пання покриття. Отримані результати дозволяють реалізувати промислове застосування двостадій- ного процесу для підвищення антикорозійних і експлуатаційних характеристик сталевих деталей.

Список літератури:

1. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу : підручник / Л. А. Яцюк, О. В. Косогін, Д. Ю. Ущатовський, О. В. Лінючева, Ю. Ф. Фатєєв; Електронні текстові дані. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 330 с.
2. Технічна електрохімія. Ч. 3. Гальванічні виробництва : Підручник, видання 2-ге, перероб. й доп. / Г. Я. Якименко, В. М. Артеменко, С. А. Лещенко. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. 225 с.
3. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи “Одержання чорних функціональних покриттів на сталях” для студентів спеціальності 161 “Хімічні технології та інженерія” денної та заочної форм навчання / уклад. С. А. Лещенко, В. В. Штефан, Н. О. Кануннікова. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. 28 с.
4. United States patent № US 6,695,931 B1. Composition and method for metal coloring process / K. N. Ravenscroft, W. V. Block; Birchwood Laboratories, Inc. Publ. date: 2003. URL: <https://patents.google.com/patent/US6695931B1/en>.
5. United States patent № US 6,899,956 B2. Metal coloring process and solutions therefor / W. V. Block, B. D. Devine; Birchwood Laboratories, Inc. 2005. URL: <https://patents.google.com/patent/US6899956B2/en>.
6. Pat. US-4728365A. Room temperature blackening solution / Paul Jarvi. Mitchell Bradford International Corp. 1988. URL: <https://patents.google.com/patent/US4728365A/en>.
7. Safety Data Sheet. Ultra-Blak 400. URL: <https://www.epi.com/media/1600/ultra-blak-400-0082.pdf>.
8. Kool-Blak 225. Mid Temperature Black Oxide Finish for Steel. Technical Data URL: <https://www.epi.com/media/93814/kool-blak-225.pdf>.
9. Safety Data Sheet. Kool-Blak 225. URL: <https://www.epi.com/media/1614/kool-blak-225-0193.pdf>.
10. Kool-Blak 180. Mid Temperature Black Oxide Finish for Steel. Technical Data. URL: <https://www.epi.com/media/93878/kool-blak-180.pdf>.
11. Kool-Blak 180 CFe. Safety Data Sheet. URL: <https://www.epi.com/media/93875/kool-blak-180-cfe-704.pdf>.
12. Tru Temp MKP/RPL Low Temperature Black Oxide. Operating Instructions. URL: https://birchwoodtechnologies.com/wp-content/uploads/2019/06/Tru_Temp_MKP-RPL_Instructions.pdf.
13. Safety Data Sheet. Tru Temp MKP. URL: https://birchwoodtechnologies.com/wp-content/uploads/2019/06/Tru_Temp_MKP_SDS.pdf.
14. E-Prep 258. Universal Steel Surface Conditioner / Activator. Technical Data. URL: <https://www.epi.com/media/1465/e-prep-258.pdf>.
15. Insta-Blak 333. Room Temperature Blackening for Iron, Steel and Powdered Metals and Architectural Finishes. Technical Data. URL: <https://www.epi.com/media/93407/insta-blak-333.pdf>.
16. Insta-Blak 333. Safety Data Sheet. URL: <https://www.epi.com/media/1266/insta-blak-333-0003.pdf>.
17. Pat. US 5,723,183 A. Metal coloring process / Richard K. Williams, David J. Halverson, James N. Tuttle, Jr. Birchwood Laboratories, Inc.– 1998. URL: <https://patents.google.com/patent/US5723183A/en>.
18. Дослідження процесу двостадійного одержання чорних гібридних конверсійних покриттів / А. В. Колжикова, С. О. Плаксієв, С. А. Лещенко. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD–2021, 18–20 травня 2021 р.: у 5 ч. Ч. II. Харків : НТУ «ХПІ». С. 167.
19. Dri-Touch IRP30 Plus Rust Preventive. Operating Instructions. URL: https://birchwoodtechnologies.com/wp-content/uploads/2019/06/Dri-Touch_IRP30_Instructions.pdf.

Leshchenko S.A., Brovin O.Yu., Deribo S.G., Muliavka D.O. STUDY OF THE TWO-STAGE FORMATION PROCESS OF BLACK HYBRID CONVERSION COATINGS ON STEEL

This work presents a comprehensive study of technological processes for obtaining conversion coatings on steel components. A review of traditional domestic methods was carried out, including thermal oxidation, hot alkaline oxidation, black phosphating in zinc-phosphate baths, and the formation of oxide-phosphate films from acidic solutions. Based on patent materials, technical datasheets, and safety certificates, the characteristics of modern blackening processes for steel are discussed. Particular attention was paid to the formation of black hybrid conversion coatings and the “cold oxidation” method. Experimental studies allowed the determination of optimal compositions of working solutions and technological parameters, ensuring effective two-stage coating formation. Components for the formation of a primary dicarboxylate layer and the subsequent black oxide coating were selected, and the optimal temperature conditions and processing durations were established, providing a dense, uniform coating resistant to wear and flaking. In the first stage of the process, an intermediate dicarboxylate layer is formed in a solution containing (g/l): oxalic acid – 15, sodium m-nitrobenzolsulfonate – 5, potassium-sodium tartrate – 0,5 at 18–25 °C for 5 min. This layer creates an active surface with a dense microcrystalline structure, ensuring effective deposition of the subsequent black oxide coating. In the second stage, oxidation is carried out in a solution containing (g/l): NaOH – 100, NaNO₃ – 35, NaNO₂ – 5, Na₂S₂O₃ – 5, Na₂MoO₄ – 5, SnCl₂ – 0,2, sodium lauryl sulfate – 0,04 at 75–80 °C for 15 min, producing a black coating with high corrosion and mechanical resistance. The results demonstrate that the developed two-stage process ensures high uniformity and reliability of the coating, making it suitable for industrial application. This approach enhances the anticorrosive and operational properties of steel components and ensures stability and reproducibility of the technological process in production, which is critical for industrial enterprises with high requirements for surface coating quality.

Key words: conversion coatings, black hybrid oxidation, dicarboxylate layer, cold oxidation, black oxide coating, steel components, anticorrosion protection, working solutions, process parameters.

Дата надходження статті: 22.11.2025

Дата прийняття статті: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 631.42-044.337:[631.333.92:631.879.4]
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/28>

Малиновський В.В.

Український державний університет науки і технологій

Мітіна Н.Б.

Український державний університет науки і технологій

ОТРИМАННЯ ПОКРАЩУВАЧА ҐРУНТУ ШЛЯХОМ АЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ КУРЯЧОГО ПОСЛІДУ В ПРОМИСЛОВИХ МАСШТАБАХ

У статті описано аеробне (аераторне) компостування підстилкового курячого посліду як перспективну технологію переробки відходів птахівництва на компост високої якості з метою покращення структури ґрунту та збагачення його гумусом. У дослідженні викладено порівняння субстратних систем, що застосовуються у промислових умовах: підстилкового курячого посліду та підстилкового гною великої рогатої худоби (ВРХ) із застосуванням технології аеробного компостування. Експеримент проводили на відкритому компостувальному майданчику в промислових обсягах продовж 89 днів. У рамках дослідження аналізували кількість технологічних операцій аеробного компостування підстилкового посліду птиці (сушіння, аерація, аерація з внесенням вологи), контролювали основні параметри процесу: склад, температура, вологість, рН. Здійснено порівняння біохімічних показників кінцевих продуктів, отриманих із субстратів на основі курячого посліду та гною ВРХ. Результати оцінювали за трансформацією органічної частини, вмістом макро та мікронутрієнтів, потенційною цінністю компостів, як покращувачів ґрунту. Зразки покращувачів ґрунту, виготовлені на основі субстрату з підстилкового курячого посліду, мають більш високу концентрацію основних макроелементів порівняно з аналогами, отриманими з підстилкового гною ВРХ: $N_{\text{заг}}$ – у 4,35 рази, P_{2O5} – у 4,33 рази, K_2O – у 1,63 рази. Органічна частина покращувача ґрунту із субстрату гною ВРХ у 1,6 рази більша, ніж у покращувача з курячого посліду, що відповідає очікуваному перетворенню відходів на стабільний матеріал з підвищеною гумусовою часткою. Субстрат із підстилкового курячого посліду забезпечує більш високу концентрацію базових поживних елементів у готовому продукті порівняно з субстратом із підстилкового гною ВРХ. В роботі зазначено, що обидва субстрати ефективні в залежності від цілей використання компосту: для швидкого збагачення макроелементами варто розглядати курячий послід, тоді як для більш стабільного та гумусоподібного матеріалу гній ВРХ. Результати надають практичні орієнтири для оптимізації промислових режимів аеробного компостування та вибору субстратів в залежності від потрібного фінального профілю покращувача ґрунту.

Ключові слова: родючість ґрунту, переробка органічних відходів, переробка відходів птахівництва, виробництво покращувача ґрунту, аеробне компостування, компост, промислове компостування, компост з пташиного посліду, ґрунт, компостування посліду, органічні відходи, переробка відходів птахівництва, органічні добрива, покращувач ґрунту, оновлення мікробіоти ґрунту, мікробіота ґрунту.

Постановка проблеми. Протягом останніх тридцяти років світова галузь птахівництва постійно еволюціонує та суттєво нарощує виробництво м'яса свійської птиці, яєць та супутніх продуктів. Показники України у галузі демонструють відносно стабільні обсяги виробництва протягом останніх десяти років (таблиця 1) [1], навіть під час військової агресії зі сторони росії у 2014 році та повномасштабного воєнного вторгнення в Україну в 2022 році.

Разом із масштабуванням галузі птахівництва зростають обсяги побічних продуктів та їх вплив на довкілля. До основних типів відходів птахівництва відносяться послід, підстилка, відходи забою та інші побічні продукти, що утворюються у процесі вирощування та переробки птиці. Найбільш небезпечним та значним за обсягом по обсягу серед побічних продуктів птахівництва є послід. Враховуючи те, що одна курка виробляє в середньому від 36 кг до 47 кг посліду на рік, то загаль-

Кількість свійської птиці в Україні станом на 1 січня

Роки	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
ПТИЦЯ, млн. голів	213,3	204,0	201,7	204,8	211,7	220,5	200,7	202,2	180,5	184,7

ний обсяг посліду, що утворює галузь в Україні, складає приблизно 6649,2–8680,0 тис. т на рік. Пташиний послід, особливо у великих кількостях, може призводити до забруднення водойм. Бактерії, розкладаючи послід, споживають кисень, що негативно впливає на водну флору і фауну. У пташиному посліді можуть міститися хвороботворні бактерії, які можуть передаватися людям та тваринам, викликаючи певні захворювання. Несвіжий пташиний послід може містити токсичні речовини, такі як скатол та індол, які негативно впливають на ріст рослин. Пташиний послід, як і інші види органічних відходів, може забруднювати ґрунт, особливо при неправильному зберіганні, переробці та утилізації. У 2024 р. в Україні зберігається тенденція до збільшення випадків загибелі птахів, зокрема диких, через хвороби, такі як пташиний грип. Небезпека від пташиного посліду є у місцях скупчення птахів, зокрема на водоймах, де вони перепочивають та харчуються. Отже, переробка та утилізація пташиного посліду є актуальною для зменшення екологічної шкоди.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Послід є джерелом цінних ресурсів для створення покращувачів ґрунту або органо-мінеральних добрив для оновлення мікробіоти ґрунту. Пташиний послід являє собою складну і неоднорідну структуру, до складу якої входять органічні та неорганічні сполуки. До органічних відносять в основному азотисті сполуки (білки, пептиди, амінокислоти) та сполуки вуглецю (ліпіди, гліцерин, жирні кислоти, вуглеводи, у тому числі клітковина, цукри, спирти, целюлозолігнин), до неорганічних – воду, аміак, деякі сполуки міді, фосфору, калію, цинку, марганцю тощо. Хімічний склад посліду різних видів птиці має свої відмінності – значний вплив здійснюють умови годівлі та утримання птиці. Цінність посліду як органічного добрива визначається насамперед вмістом хімічних елементів, таких як азот, фосфор та калій [2]. На сьогодні пропонується цілий ряд технічних та технологічних рішень щодо перероблення пташиного посліду. Аналіз ідей щодо використання посліду птахів дозволяє виділити такі запатентовані технології: внесення в ґрунт без обробки – в чистому вигляді, переробка шляхом тривалого витримування, переробка пасивним методом компостування у бурти, переробка активним методом компостування у бурти, меха-

нічне сушіння в центрифугі або прес-фільтрах, вакуумне сушіння, термічне сушіння (можливо в поєднанні з грануляцією) кавітаційний спосіб знезараження рідкого гною та посліду, біоферментація в установках барабанного і камерного типу, вермікомпостування, мікробіологічна конверсія гною та посліду, виробництво біогазу (метанове зброджування), піроліз (термічне розкладання посліду без доступу кисню), спалювання для отримання альтернативної електричної енергії, спалювання для отримання теплової енергії, виробництво біопалива, а також комбінації вищезгаданих методів [3]. Розглянуто можливість виробництва кормів для відгодівлі птиці з пташиного посліду [4].

Постановка завдання. Дослідити технологічний процес одержання компосту як покращувача ґрунту методом аеробного компостування підстилкового курячого посліду у промислових умовах на відкритому ґрунті.

Виклад основного матеріалу. Експеримент проводили на відкритому майданчику поблизу села Верхівськ, Рівненський район, Рівненська область, Україна. Технічну підтримку проведення дослідження забезпечила компанія ТОВ «О.П.Є.». В технології аеробного компостування використовувалась спеціальна техніка: самохідний аератор BACKHUS A30, який забезпечував такі функції як сушіння, змішування, подрібнення, рівномірний розподіл колоній бактерій та мікроміцетів, насичення киснем, зволоження субстрату; телескопічний навантажувач Manitu MT-X 735; трактор Case IH Magnum 310 із діжкою для води на 5 т. Аналіз змін у субстраті під час компостування визначалися в польових умовах візуально, заміри основних показників температури – з використанням біметалевого термометра для компосту TFA 192008; кислотність і вологість вимірювали аналізатором ґрунту ZD-05 (PH 3–8; RH: 10–80%), індикаторними смужками Indicator Strips JTP pH (4,0–7,5); атомно-емісійну спектроскопію – приладом Avio 220 Max; хімічний склад початкового субстрату та зрілого компосту визначалися за ДСТУ ISO10012:2005.

Результати роботи. Об'єктом дослідження є субстрат з підстилкового посліду, до складу якого входить 10% соломи та 90% посліду. Біохімічний склад субстрату у співвідношенні C:N = 10:1 наведено в таблиці 2.

Субстрат, загальною вагою 2520 тонн, було укладено у 61 борт довжиною від 20 до 54,5 погонних метрів кожен. За дослідний було прийнято борт № 29. Лінійні параметри дослідного борту наведено в таблиці 3.

Субстрат закладено в бурти на відкритому ґрунті в лютому 2024 року за початкових середньодобових температур біля 4°C. Компостування тривало 93 доби на майданчику під природним впливом зовнішнього середовища. Першу половину дослідження (до 41 доби експерименту) середньодобова температура повітря коливалась у діапазоні 4–6°C, що суттєво вплинуло на термін проходження термофільної фази процесу аеробного компостування. Починаючи з 45 доби за середньодобових показників температури біля 10°C, розпочався перехід процесу компостування у мезофільну фазу. Динаміка змін температури повітря під час компостування підстилкового

посліду птиці у промислових обсягах на відкритому майданчику наведено на рисунку 1.

Схематичні зображення розташування буртів на промисловому майданчику зображено на рисунку 2а, блок-схема процесу аеробного компостування зображено на рисунку 2б.

Технологія процесу аеробного компостування на відкритому ґрунті [5] проведена на основі субстрату з підстилкового посліду птиці. Зміна показників температури, вологості та кислотності зображені на рисунку 3. Заміри проводилися у трьох контрольних точках борту на відстані 11 м одна від одної на глибині 35–50 см від площини бокової поверхні борту.

Початковий середній показник температури в бурті становив 67,3°C – обумовлено тим, що перша – мезофільна фаза процесу аеробного компостування пройшла на етапі підготовки субстрату або безпосередньо в курнику. Підставою



Рис. 1. Динаміка змін температури повітря в процесі аеробного компостування підстилкового посліду птиці на відкритому майданчику

Таблиця 2

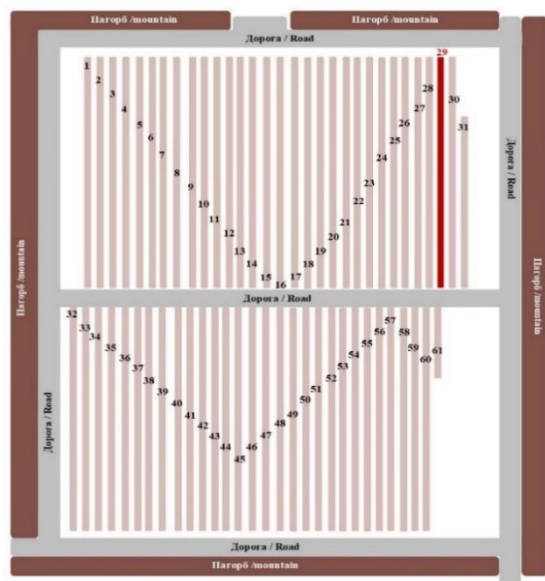
Показники хімічного складу субстрату на основі підстилкового курячого посліду

Показник	Фактичний вміст, %	Методика виконання досліджень
Масова частка сухої речовини	49,1	МВ 004-2019
Масова частка органічної речовини	65	ДСТУ 8454-2015
Показник	Фактичний вміст, %	Методика виконання досліджень
N заг. (загальний азот)	2,3	ДСТУ 7911:2015
P ₂ O ₅ (загальний фосфор)	0,9	МВ 005-2019
K ₂ O (масова частка калію)	1,2	ДСТУ 7949:2015
Кислотно-лужний баланс, рН	6,4	ДСТУ ISO 10390-2007

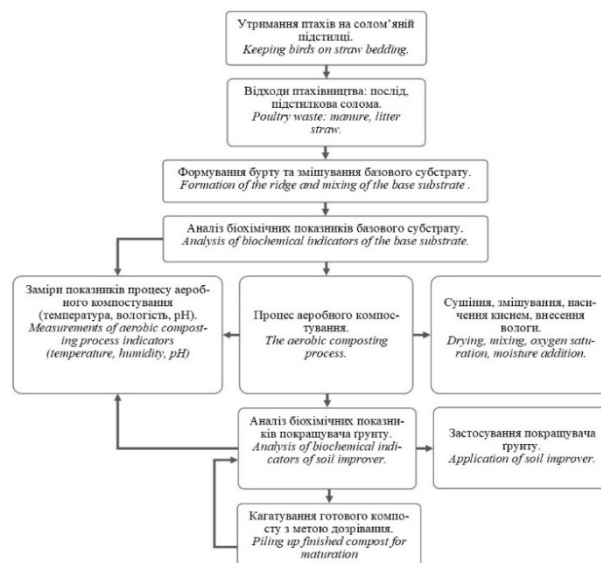
Таблиця 3

Лінійні параметри дослідного борту

Означення лінійних параметрів	Маркування дослідного борту	a, м	h, м	l, м	Початкова вага борту, т
	Дослідний Борт №29	3,0	1,2	45	40,5



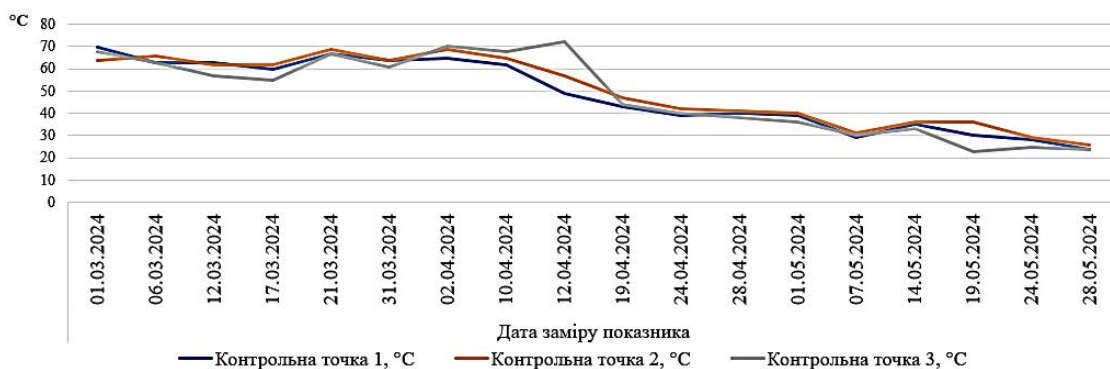
а



б

Рис. 2. Розташування субстрату та процес компостування
а) розташування буртів з субстратом б) блок-схема процесу аеробного на промисловому майданчику компостування

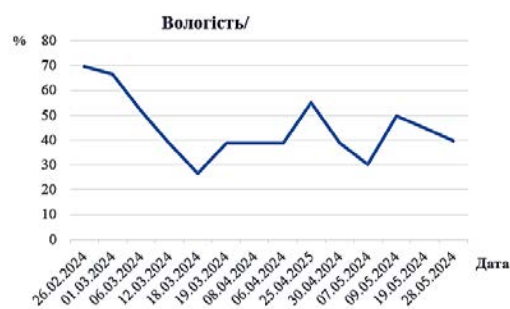
Зміна температури в субстраті під час процесу аеробного компостування



а) температура



б) кислотність



в) вологість

Рис. 3. Параметри показників субстрату в процесі аеробного компостування
а) температура б) кислотність в) вологість

для висновку є використання у технологічному процесі знезараження та підготовки приміщень для птиці очищувального засобу на основі суміші неорганічних кислот, до складу якого входять: вода, ортофосфорна кислота від 15% до 30%, поверхнево-активні речовини $\geq 5\%$ (ТУ У 20.4.-42898294-001:2019). Фактично ортофосфорна кислота виконала функцію стимулятора розвитку колоній термофілів. Відомі дослідження, в яких наведено приклад, коли після внесення біопрепарату в процесі аеробного компостування, дія якого по заяві виробника орієнтована на знезараження та ефективне аеробне компостування, перша фаза – мезофільна – зникає, а температура, лише за добу після внесення біопрепарату, зростає майже на 30°C [6]. З метою дотримання технології аеробного компостування [5] температурний режим штучно підтримували у діапазоні $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$. Вказаний діапазон температури забезпечує знезараження субстрату, деактивацію насіння бур'янів та недопускання згорання органічної речовини. Підтримка основних параметрів процесу аеробного компостування здійснювалося за рахунок проведення десяти аерацій та одноразового внесення вологості. Періодичність аерацій, опадів та внесення води наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Періодичність проведення аерацій, внесення води, та атмосферних опадів під час дослідження

Дата	Аерація/ № аерації	Внесення води	Опади
26.02.2024	так/№ 1	ні	ні
02.03.2024	так/№ 2	ні	ні
06.03.2024	так/№ 3	ні	ні
12.03.2024	так/№ 4	ні	ні
17.03.2024	ні	ні	Помірний дощ (4,8 мм)
18.03.2024	так/№ 5	ні	ні
19.03.2024	так/№ 6	ні	ні
31.03.2024	так/№ 7	ні	ні
03.04.2024	ні	ні	Помірний дощ (5 мм)
06.04.2024	так/№ 8	ні	Помірний дощ (6 мм)
12.04.2024	так/№ 9	ні	ні
19.04.2024	ні	ні	Дощ (10 мм)
24.04.2024	ні	ні	Сильний дощ (15 мм)
08.05.2024	так/№ 10	так	ні

Аерації 1, 2, 3 та 10 проводились з метою зменшення вологості субстрату (від 70% до

52%), а 4, 5, 6, 7, 8 та 9 – з метою насичення киснем, подрібнення субстрату та рівномірного розподілу колоній бактерій у бурті. Майже 50 діб аеробного компостування температура субстрату трималась в діапазоні термофільної фази від 59°C до 68°C . Починаючи із 54 доби показники температури знизились до 45°C , процес почав переходити у третю – мезофільну фазу. Суттєві опади (10 мм та 15 мм) на 54 і 59 добі експерименту підвищили вологу субстрату до 57% та знизили темпи процесу компостування. У зв'язку з неможливістю проведення аерацій на відкритому ґрунті після суттєвих опадів, процеси в бурті протікали природним шляхом. На 66 добу, в бурті зафіксовано зниження вологості до 30%. На 73 добу експерименту разом із проведенням аерації в борт було додано воду, що підвищило вологість з 30% до 50%. На 89 добу експерименту температура бурта фактично зрівнялась із температурою навколишнього середовища, що демонструє перехід процесу компостування у четверту фазу – стабілізації. Проведені лабораторні дослідження хімічного складу готового компосту наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Біохімічні показники покращувача ґрунту отриманого шляхом аеробного компостування на основі субстрату з підстилкового посліду птиці

Показники	Фактичний вміст	Ідентифікація використаного методу
Масова частка сухої речовини, %	77,33	МВ 004-2019
Масова частка органічної речовини, %	27,92	ДСТУ 8454-2015
$N_{\text{заг}}$ (загальний азот) на суху речовину, %	3,67	ДСТУ 7911:2015
P_2O_5 (загальний фосфор) на суху речовину, %	2,25	МВ 005-2019
K_2O (масова частка калію) на суху речовину, %	2,34	ДСТУ 7949:2015
Кислотно-лужний баланс, pH	8,84	ДСТУ ISO 10390-2007

В таблиці 6 наведено порівняння основних біохімічних показників покращувачів ґрунту на основі субстратів з підстилкового курячого посліду та підстилкового гною великої рогатої худоби отриманих за ідентичною технологією [5].

Таблиця 6

**Порівняння біохімічних показників
покращувача ґрунту отриманих шляхом
аеробного компостування на основі субстратів
двох типів**

Показники	Покращувач ґрунту отриманий на основі підстилкового курячого посліду	Покращувач ґрунту отриманий на основі підстилкового гною ВРХ
Масова частка органічної речовини, %	27,92	45,00
Нзаг (загальний азот) на суху речовину, %	3,67	0,84
P ₂ O ₅ (загальний фосфор) на суху речовину, %	2,25	0,52
K ₂ O (масова частка калію) на суху речовину, %	2,34	1,44
pH	8,84	8,80

Кислотно-лужний баланс обох покращувачів – лужний. Основні біохімічні показники покращувача ґрунту отриманого на основі субстрату з підстилкового курячого посліду вищі за показники покращувача ґрунту отриманого на основі субстрату з підстилкового гною ВРХ: Нзаг – в 4,35 рази, P₂O₅ – в 4,33 рази та K₂O – в 1,63 рази. В той же час органічна складова покращувача ґрунту, отриманого на основі субстрату з підстилкового гною ВРХ в 1,6 разів вища за відповідний показник покращувача ґрунту, отриманого на основі субстрату з підстилкового курячого посліду.

Висновки. В статті розглянуто промислове аеробне компостування підстилкового курячого посліду з метою отримання компосту високої якості для покращення структури ґрунту, збагачення його гумусом. Експериментально (за 89 діб) визначено типи та кількість операцій, потрібних для якісного аеробного компостування (сушіння, аерація, аерація з внесенням вологи) обраної сировини з постійним контролем параметрів технологічного процесу (склад, температура, вологість, pH). За однакової технології промислові зразки покращувачів ґрунту, виготовлених на основі субстрату з підстилкового

курячого посліду, демонстрували більш високу концентрацію основних макроелементів порівняно з аналогами, отриманими з підстилкового гною ВРХ: Нзаг – в 4,35 рази, P₂O₅ – в 4,33 рази, K₂O – в 1,63 рази, але органічна частина покращувача ґрунту із субстрату гною ВРХ була у 1,6 рази більшою, ніж у покращувача на основі курячого посліду, що відповідає очікуваному перетворенню відходів на стабільний матеріал з підвищеною гумусовою часткою. Такі відмінності свідчать про різний вплив вихідних субстратів на кінцеві властивості компостів та їхню потенційну придатність як покращувачів ґрунтів. За однакових технологічних параметрів аеробного компостування субстрат із підстилкового курячого посліду забезпечує більш високу концентрацію базових поживних елементів у кінцевому продукті порівняно з субстратом із підстилкового гною ВРХ. Органічна частина покращувача з гною ВРХ є вищою внаслідок більшої стабілізації матеріалу та потенційного гумусового вмісту, що підвищує загальну цінність для покращення ґрунтів. Таким чином, обидва субстрати ефективні в залежності від цілей використання компосту: для швидкого збагачення макроелементами варто розглядати курячий послід, тоді як для більш стабільного та гумусоподібного матеріалу – гній ВРХ. Результати надають практичні орієнтири для оптимізації промислових режимів аеробного компостування та вибору субстратів в залежності від потрібного кінцевого профілю покращувача ґрунту.

Фінансування. Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування. Подяки. ТОВ «Науковий парк «Наука і Технології» за підтримку у адмініструванні та організації дослідів, ТОВ «О.П.Є.» за надане обладнання, та проведення необхідних операцій в технологічному процесі промислового аеробного компостування на відкритому майданчику, ТОВ «МАЯК-3» за активну участь, технічну підтримку у проведенні дослідницьких робіт, проактивну позицію в напрямку циркулярної економіки, охорони довкілля та сталого розвитку, Асоціації «Компосту» за консультації та підтримку щодо питань технологічного процесу.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури:

1. Державна служба статистики України. <https://www.ukrstat.gov.ua>
2. Мельник В.О., к.с.-г.н., Інститут птахівництва НААН, «Пташиний послід: вихід, хімічний склад та основні способи переробки», Державна дослідна станція птахівництва, Інститут тваринництва НААН. URL: <http://avianua.com/index.php/statti-z-ptakhivnitstva/tekhnologiya-ptakhivnitstva/12-ptashinij-poslid-himichnyj-sklad#content>

3. А. С. Комар, інж. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Сучасні запатентовані способи переробки посліду птахів. *Науковий вісник ТДАТУ*. Вип. 11, том 2, С. 4–5.

4. Економічне обґрунтування переробки відходів птахівництва на кормові домішки, Хомяков В.І., д.т.н., професор, Вяткін П.С. Черкаський державний технологічний університет. URL: https://chdtu.edu.ua/files/feu/Pratsi/KEU/Viatkin/6-Econ_obgrunt.pdf

5. Малиновський В.В., Мітіна Н.Б., Технологія отримання покращувача ґрунту шляхом аеробного компостування. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 35 (74) № 6. 2024. С.186–192

6. Малиновський В.В., Мітіна Н.Б., Вплив біопрепаратів на якість компосту при технології аеробного компостування. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 36 (75). №3. Ч. №1. 2025. С. 231–238.

Malynovskyi V.V., Mitina N.B. OBTAINING SOIL IMPROVER BY AEROBIC COMPOSTING OF CHICKEN MANURE ON AN INDUSTRIAL SCALE

The article describes aerobic (aerator) composting of litter chicken manure as a promising technology for processing poultry waste into high-quality compost to improve soil structure and enrich it with humus. The study presents a comparison of substrate systems used in industrial conditions: chicken litter and cattle (BCM) litter using aerobic composting technology. The experiment was conducted on an open composting site in industrial volumes for 89 days. The study analyzed the number of operations of the technology of aerobic composting of poultry litter (drying, aeration, aeration with moisture), controlled the main process parameters: composition, temperature, humidity, pH. A comparison of biochemical indicators of final products obtained from substrates based on chicken litter and cattle manure was carried out. The results were evaluated by the transformation of the organic part, the content of macro and micronutrients, the potential value of composts as soil improvers. Samples of soil improvers made on the basis of a substrate from litter chicken manure have a higher concentration of basic macroelements compared to analogues obtained from litter cattle manure BCM: N_{total} – 4.35 times, P_2O_5 – 4.33 times, K_2O – 1.63 times. The organic part of the soil improver from the substrate from cattle manure is 1.6 times greater than that of the improver from chicken manure, which corresponds to the expected transformation of waste into a stable material with an increased humus content. The substrate from litter chicken manure provides a higher concentration of basic nutrients in the finished product compared to the substrate from litter cattle manure BCM. The work indicates that both substrates are effective depending on the goals of compost use: for rapid enrichment with macroelements, chicken manure should be considered, while for a more stable and humus-like material, cattle manure BCM. The results provide practical guidelines for optimizing industrial aerobic composting regimes and selecting substrates depending on the desired final soil improver profile.

Key words: soil fertility, organic waste processing, poultry waste processing, soil improver production, aerobic composting, compost, industrial composting, poultry manure compost, soil, manure composting, organic waste, poultry waste processing, organic fertilizers, soil improver, soil microbiota renewal, soil microbiota.

Дата надходження статті: 19.11.2025

Дата прийняття статті: 02.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Румянцева М.О.

Український державний університет науки і технологій

Мисов О.П.

Український державний університет науки і технологій

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ КРЕМНЕЗЕМУ СІРЧАНОКИСЛОТНИМ СПОСОБОМ (ЧАСТИНА I)

У роботі розглянуто методичні підходи до комп'ютерного моделювання процесу осадження аморфного діоксиду кремнію сірчанокислотним способом. Проведено аналіз публікацій та обґрунтовано вибір програмного комплексу **ChemCAD** для дослідження теплових і кінетичних параметрів реакції. Представлено термодинамічні розрахунки ентальпій стадій утворення H_4SiO_4 і SiO_2 , визначено лімітуючі фактори процесу та параметри моделі реактора. Виконано оцінку теплового режиму та розраховано вимоги до системи охолодження і регулювання температури. Отримані результати дозволяють сформулювати методичну основу для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію промислового синтезу кремнезему.

Розглянуто вплив різних режимів подачі реагентів на стабільність температурного поля в реакторі, що безпосередньо впливає на морфологію частинок та питому поверхню кінцевого продукту. Проаналізовано переваги та недоліки ступінчастого, безперервного і синхронного способів подавання кислоти, а також їх вплив на локальні параметри середовища. Звернуто увагу на роль теплового балансу і гідродинамічних ефектів, що дозволяє передбачати ризики локальних перегрівів і неконтрольованого росту частинок, а також оптимізувати апаратне оформлення реактора.

Застосування комп'ютерного моделювання дає змогу проводити систематичну оцінку процесу без великої кількості експериментів, знижуючи витрати часу та матеріалів. Додатково наведено практичні рекомендації щодо вибору режимів подачі, типу охолоджувальної системи та параметрів керування, що забезпечують підвищення стабільності процесу, зниження енергетичних витрат і поліпшення відтворюваності отриманих результатів.

Ключові слова: кремнезем, сірчанокислотний метод, комп'ютерне моделювання, ChemCAD, термодинаміка, тепловий режим.

Постановка проблеми. Сучасне хімічне виробництво висуває високі вимоги до контролю параметрів технологічних процесів, особливо в умовах екзотермічних реакцій, де нестійкість температурного режиму може істотно вплинути на властивості кінцевого продукту. У зв'язку з цим особливої значущості набуває використання методів комп'ютерного моделювання, що дають змогу на стадії проектування й оптимізації процесів передбачати поведінку системи та вибирати оптимальні режими. Одним з ефективних інструментів для розв'язання подібних завдань є програмний комплекс ChemCAD, широко застосовуваний у хіміко-технологічних розрахунках та інженерному аналізі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес отримання аморфного кремнезему сір-

чанокислотним способом на основі гідролізу розчину рідкого скла (натрієвого силікату) сірчаною кислотою добре відомий, проте залишається низка невирішених питань, пов'язаних з керуванням тепловим режимом і гідродинамікою в зоні осадження [1–7]. Згідно з літературою, ключовим параметром, що визначає морфологію, ступінь агрегації та питому поверхню обложеного SiO_2 , є температура в зоні облягання: її підвищення зазвичай призводить до укрупнення частинок і зниження сорбційних властивостей матеріалу [1–3, 6].

Екзотермічність реакції нейтралізації робить процес чутливим до способу введення кислоти і до режиму відведення тепла. У працях, присвячених багатоступеневим схемам подачі, описано поетапне дозування кислоти для роздільного

контролю нуклеації та подальшого зростання агрегатів [4, 5]. Перевага ступеневої подачі – тонший контроль розмірів первинних зародків і зниження неконтрольованої агрегації; це дає змогу отримувати вужчий розподіл за розміром і вищу питому поверхню за інших рівних умов [4].

Водночас ступінчаста схема має очевидні недоліки: складність управління великим числом параметрів (час і обсяг кожної стадії, концентрація, швидкість дозування), що ускладнює відтворюваність і особливо масштабування на промислових установках; підвищена чутливість до флуктуацій температури та перемішування призводить до варіативності властивостей між партіями; крім того, багаторазове подавання нерідко подовжує час процесу та потребує складнішої апаратури/автоматизації [4; 5].

Безперервний (одноетапний) режим – за якого кислоту вводять безперервно або в одній великій дозі – простий у реалізації та зручний для безперервного промислового виробництва, забезпечує високу продуктивність і легку інтеграцію в поточкові лінії [6]. Однак різке зниження рН у точці змішування може спровокувати інтенсивну неконтрольовану нуклеацію і швидке зростання частинок з отриманням широкого розподілу за розмірами і зниженням питомої поверхні. У безперервному режимі складніше відокремити стадію нуклеації від стадії росту частинок, а також точково регулювати локальний рН і поле зсувних швидкостей, що позначається на пористості та дисперсності продукту [5; 6]. Крім цього, безперервний режим чутливий до флуктуацій вихідного складу (концентрація силікату, температура), що вимагає надійної стабілізації витратних потоків.

Синхронне (simultaneous) подавання – одночасне узгоджене подавання кислоти та розчину натрієвого силікату до зони змішання – дає змогу точніше задавати локальний рН та інтенсивність місцевого змішання саме в момент нуклеації, що теоретично дає додаткові можливості щодо управління морфологією частинок [7]. На практиці синхронна подача вимагає високоточного насосного і змішувального обладнання (точне співвідношення потоків), а також адаптованих інжекційних пристроїв, щоб уникнути локальних «гарячих» або «концентраційних» піків, які призводять до неоднорідної структури частинок або утворення великих агрегатів. Ці вимоги підвищують капітальні витрати і складність експлуатації [6, 7].

Зіставлення розглянутих схем показує, що вибір режиму подачі істотно впливає на морфологію, питому поверхню, розподіл за розмірами

і реологічні властивості суспензії осаду. На практиці застосовуються гібридні підходи (наприклад, стартовий щабель для нуклеації з подальшим безперервним подаванням для контролю росту), але загальноприйнятої універсальної схеми немає: потрібні систематичні дослідження.

Таким чином, кожна з трьох схем (ступінчаста, безперервна, синхронна) має переваги та недоліки; для раціональної оптимізації процесу отримання обложеного SiO_2 необхідні додаткові експериментальні та теоретичні дослідження, які включають кількісні порівняння за ідентичних рецептур, детальний контроль локального рН та температури, вивчення масштабованості та впливу гідродинаміки на структуру та властивості кінцевого продукту.

Зважаючи на виявлені недоліки експериментальних схем (ступінчаста, безперервна та синхронна подача) доцільним напрямом розвитку досліджень є використання імітаційного моделювання. Сучасні програмні комплекси, зокрема, ChemCAD, дають змогу будувати адекватні моделі процесів нейтралізації, враховувати теплові та гідродинамічні ефекти, дослідити вплив локального рН, температури та витрати реагентів без проведення великої кількості дорогих і трудомістких експериментів.

Використання імітаційного моделювання відкриває можливості для:

- аналізу теплового режиму під час осадження SiO_2 ;
- вивчення впливу варіантів подачі реагентів (ступінчастої, безперервної, синхронної) на локальні параметри середовища;
- перевірки сценаріїв масштабування лабораторних режимів у промислових умовах;
- оптимізація апаратурного оформлення та вибір насосно-змішувального обладнання.

Такий підхід широко використовується як у світовій практиці, так і в науково-технічних дослідженнях [8–10].

Постановка завдання. Метою цієї роботи є дослідження впливу способу подачі сірчаної кислоти на температурний режим процесу синтезу аморфного кремнезему з використанням імітаційного моделювання. Основну увагу приділено аналізу можливості стабілізації температури в оптимальному діапазоні (близько 82°C), за якого забезпечуються найкращі дисперсні характеристики продукту. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- Розробка моделей технологічної схеми процесу синтезу в середовищі ChemCAD за різних режимів подачі кислоти;

– Розрахунок і порівняння температурних профілів реактора за ступінчастого, безперервного й одночасного подавання кислоти та рідкого скла (силікат натрію);

– Формулювання рекомендацій щодо управління тепловими ефектами реакції з метою поліпшення якості продукту.

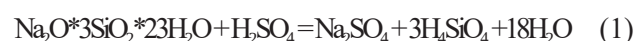
Виклад основного матеріалу. Об'єктом цього дослідження є процес отримання аморфного діоксиду кремнію (кремнезему) сірчано-кислотним методом. Цей спосіб заснований на кислотному гідролізі розчину рідкого скла, що супроводжується екзотермічним ефектом.

У розрахунках використовувалися дані рідкого скла з модулем 3 і густиною 1,45 г/см.куб. Кількість сухої речовини становила 37%. Розрахункова хімічна формула $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 23\text{H}_2\text{O}$.

Сірчана кислота для спрощення розрахунків бралася концентрована, зі 100% вмістом основної речовини.

Процес сірчано-кислотного осадження кремнезему із силікату натрію складається з двох етапів:

1 етап взаємодія силікату натрію і концентрованої сірчаної кислоти з утворенням мономера H_4SiO_4



2 етап утворення SiO_2



Обидві реакції екзотермічні. Термодинамічні розрахунки ентальпій реакцій (1) і (2) за температури 82 °C складають -162.91 kJ/mol та -15.07 kJ/mol відповідно.

Лімітуючою реакцією є реакція (2). Енергія активації 44900 Дж/моль, передекспоненціальний множник 155000 1/хв [2].

Під час термодинамічних розрахунків для процесів, таких як сірчано-кислотне осадження силікату натрію, необхідно правильно визначити, яку форму кремнію в розчині (тобто форму мономера) потрібно враховувати. Це важливо, оскільки силікатні розчини містять різні ступені полімеризації кремнієвих видів, і залежно від рН і концентрації переважає та чи інша форма. Нами була прийнята **Ortho-silicic acid** – H_4SiO_4 (ортокремнієва кислота), як найстабільніша та основна форма мономера в розбавлених розчинах кремнієвої кислоти за нейтральних і слабкокислих рН.

Підтримання температури в межах оптимального діапазону (близько 82 °C) критично важливе для забезпечення необхідних дисперсних характеристик кінцевого продукту, таких як середній розмір частинок і питома поверхня. Перевищення

допустимої температури призводить до коагуляції частинок і зниження якості кремнезему, що обмежує можливості його подальшого застосування, зокрема в сорбційних і каталітичних системах. Зменшення температури знижує швидкість утворення зародкових частинок SiO_2 і призводить до погіршення монодисперсності продукту.

Імітаційне моделювання проводилося в програмному середовищі ChemCAD, версія 7.1.6., модель реактора Vessel Reactor. З внутрішньої бібліотеки вибирався вертикальний, циліндричний реактор періодичної дії типу Pfaudler, об'ємом 1 м. куб з еліптичним днищем і з можливістю відведення тепла через стандартну сорочку. Для інтенсифікації перемішування, що забезпечує рівномірний розподіл реагентів і запобігання локальним перегріванням, передбачалася якірна мішалка діаметром 0.3 м з частотою обертання 10 об/сек. Час процесу становив 200 хв із кроком 1 хв.

Як основу модельованого процесу використано типову схему синтезу кремнезему, що включає стадії підготовки вихідного розчину силікатів, подачі сірчаної кислоти й осадження твердої фази.

Моделювання теплових ефектів проводилося з використанням вбудованих термодинамічних пакетів (NRTL і UNIQUAC), що забезпечують точний розрахунок теплових балансів.

У всіх модельованих варіантах подачі реагентів застосовували систему автоматичного регулювання температури зі зворотним зв'язком, що ґрунтується на показаннях термодатчиків;

З огляду на істотно інерційний характер об'єкта регулювання, нами було застосовано П-регулятор.

Застосування П-регулятора і велика витрата охолоджувальної води під час моделювання може зменшити вплив екзотермічного ефекту реакцій, приховати різницю в температурній стабільності різних способів подачі кислоти, і тим самим унеможливити їх коректне порівняння. Тому нами було зроблено оцінку максимальної потужності охолоджувальної води, що підводиться, і розраховано відповідний коефіцієнт витрати регульовального клапана Cv. У розрахунках приймали, що відхилення температури має бути не більше, ніж 8 °C, протягом 100 хв.

Для оцінки можна використовувати формулу:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3)$$

де:

Q – потужність теплообміну, Вт

m – масова витрата води, кг/с

c – питома теплоємність води ~4180, Дж/кг·K

ΔT – різниця температур води на вході та виході реактора, 8, °C

Потужність теплообміну при вирівнюванні температури можна знайти з виразу:

$$Q = G / t \cdot 60 \quad (4)$$

де:

t – умовний час вирівнювання температури, 100 хв;
 G – кількість енергії, яку необхідно погасити (сума ентальпій реакцій (1) та (2)), 69917.3, кДж.

З формули (3) знаходимо масову витрату охолоджувальної води $m = Q / (c \cdot \Delta T) = 20.9$ кг/мин
 m – масова витрата води для компенсації відхилення температури від номінальної, кг/хв;
 З виразу [11] знаходимо

$$C_v = 1.156 \cdot m / \sqrt{\Delta P} \quad (5)$$

де:

$\Delta P = 1,5$ атм, перепад тиску на регульовальному клапані.

У підсумку отримуємо $C_v = 1,32$

Як цільові параметри оцінювання використували:

- температурний профіль у часі;
- пік температури в реакційній зоні;
- максимальне відхилення температури реактора від оптимального значення (82 °C);

– ефективність відведення тепла за різних варіантів подачі реагентів.

Висновки

– Процес сірчаноокислотного осадження кремнезему є екзотермічним, що накладає суворі вимоги на підтримання температурного режиму. Проведені термодинамічні розрахунки показали, що основна енергія виділяється на стадії утворення мономера H_4SiO_4 , тоді як стадія його конденсації є лімітуючою за швидкістю.

– Оптимальна температура синтезу (~82 °C) забезпечує отримання кремнезему з найкращими дисперсними характеристиками; відхилення від цього діапазону призводять до укрупнення частинок або уповільнення процесу нуклеації.

– Розроблена в ChemCAD модель реактора дає змогу враховувати теплообмін і динаміку реакції, що робить її придатною для прогнозування поведінки системи.

– Розрахунки потрібної витрати охолоджувальної води (20,9 кг/хв) і параметрів регульовального клапана ($C_v = 1,32$) дають практичні орієнтири для проєктування систем термостабілізації.

– Отримані результати формують методичну базу для подальших досліджень впливу різних схем подачі реагентів.

Список літератури:

1. Wilhelm S., Kind M. Influence of pH, Temperature and Sample Size on Natural and Enforced Syneresis of Precipitated Silica. *Polymers*. 2015. Vol. 7, № 12. P. 2504–2521. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym7121528>
2. Мельников Б.І., Савченко М.О., Набивач В.М. Дослідження кінетики поліконденсації кремнієвих кислот у процесі сірчаноокислотного методу осадження високодисперсного діоксиду кремнію. *Питання хімії та хімічної технології*. 2008. №3. С. 125–129. URL: <https://udhtu.edu.ua/public/userfiles/file/VHHT/2008/4/Melnikov.pdf>
3. Bogoevski S. Thermal Changes of Amorphous SiO_2 as a Consequence of a Precipitation Temperature. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2000. Vol. 44, № 2. P. 133–140. URL: <https://pp.bme.hu/ch/article/view/342/180>
4. Schlomach J., Kind M. Investigations on the semi-batch precipitation of silica. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 277, № 2. P. 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.04.051>
5. Mujkanović A., Petrovski P., Rizvanović M., Busatlić I. Precipitation of silica from diluted sodium silicate solutions. *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 2011. Vol. 12, № 3. P. 1017–1022. URL: https://www.researchgate.net/publication/290544636_Precipitation_of_silica_from_diluted_sodium_silicate_solutions
6. Process for preparing precipitated silica: Пат. US 4,857,289 США : МПК C01B 33/093, C01B 33/18. № 191,751; заявл. 05.05.1988; опубл. 15.08.1989. 8 с. URL: <https://patents.google.com/patent/US4857289A/en> (дата звернення: 06.11.2025).
7. Precipitated silica and process for its manufacture: Пат. EP 3857298 B1 Європа : МПК C01B 33/18, C01B 33/193. № 20734019.1; заявл. 23.06.2020; опубл. 19.07.2023, Бюл. № 2023/29. 4 с. URL: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20230719/patents/EP3990389NWB1/document.pdf> (дата звернення: 28.08.2025).
8. Левчук І., Мисов О., Фесенко К., Шейкус А. Моделювання хіміко-технологічних процесів у SCADA за допомогою технології Open Platform Communications. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 2(94). С. 59–65. (Наукометрична база Scopus). URL: <http://nti.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/REKS/2020/REKS220/Levchuk.pdf>
9. Батура Д. О., Мисов О. П. Система автоматизованого управління відділенням вилуговування міді з мідного брукху. *ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»*: VI Міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, 4–6 листопада 2020 р). Дніпро, 2020. С.178. DOI: 10.32434/CMOCS-2020. URL: https://it.nmu.org.ua/ua/scientific_activity/files/kmoss2020.pdf

10. Рахмедова Т. Б., Безносик Ю. О. Системний аналіз, комп'ютерне моделювання та автоматизація процесу синтезу етилбензолу / *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*: матеріали VIII Між-нар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів АКІТ-2021. (Київ, 21–22 квітня 2021 р.), Київ, 2021. URL: <https://tpza.kpi.ua/conferences/proceedings/AKIT-2021.pdf>

11. Baker Hughes. Masoneilan™ Control Valve Sizing Handbook: Technical Specifications. Rev. C – 02/2022. Baker Hughes, 2022. URL: <https://dam.bakerhughes.com/m/47616eb160214a1d/original/MN-Valve-Sizing-Handbook-GEA19540A-English-pdf.pdf> (дата звернення: 06.11.2025).

Rumiantseva M.O., Mysov O.P. COMPUTER MODELING OF THE SILICA PRECIPITATION PROCESS BY THE SULFURIC ACID METHOD (PART I)

The paper discusses methodological approaches to computer modeling of the precipitation process of amorphous silicon dioxide by the sulfuric acid method. An analysis of publications was carried out, and the ChemCAD software package was justified as a suitable tool for studying the thermal and kinetic parameters of the reaction. Thermodynamic calculations of the enthalpies of the formation stages of H_4SiO_4 and SiO_2 are presented, the limiting factors of the process and the reactor model parameters are determined. An assessment of the thermal regime was performed, and the requirements for the cooling and temperature control systems were calculated. The obtained results form a methodological basis for further studies aimed at optimizing the industrial synthesis of silica.

The influence of different reagent feed modes on the stability of the temperature field in the reactor was examined, as this directly affects the particle morphology and specific surface area of the final product. The advantages and disadvantages of stepwise, continuous, and synchronous acid feed methods were analyzed, along with their impact on local process parameters. Attention was given to the role of heat balance and hydrodynamic effects, which makes it possible to predict the risks of local overheating and uncontrolled particle growth, as well as to optimize the reactor's design.

The use of computer modeling enables systematic evaluation of the process without a large number of experiments, thereby reducing time and material costs. Additionally, practical recommendations are provided regarding the choice of feed modes, cooling system types, and control parameters that ensure increased process stability, reduced energy consumption, and improved reproducibility of the obtained results.

Key words: silica, sulfuric acid method, computer modeling, ChemCAD, thermodynamics, thermal regime.

Дата надходження статті: 12.11.2025

Дата прийняття статті: 05.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 543.544.5:546.57:547.56:504.064.4
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/30>

Скиба М.І.

Український державний університет науки та технологій

Воробйова В.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Скиба Ю.М.

Український державний університет науки та технологій

МОДИФІКУВАННЯ ЦИСТЕАМІНОМ НАНОДИСПЕРСІЙ ЗОЛОТА І ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ЕКСПРЕС ВИЯВЛЕННЯ ПОЛЮТАНТІВ: СЛІДОВОЇ КІЛЬКОСТІ 2,4,6-ТРИНІТРОТОЛУОЛУ (ТРОТИЛ) У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ

Наразі розробка методів, підходів та матеріалів чутливого та вибіркового виявлення нітроароматичних вибухових речовин є актуальним для вирішення окремих питань у сфері забезпечення здоров'я людини, збереження сталого розвитку навколишнього середовища, громадської безпеки та військових питань. Здійснено застосування попередньо плазмохімічно синтезованих стабільних цитратом натрію та карбоксиметилцеллюлозою дисперсій нанозолота та представлено данні методики їх модифікування β -цистеаміном. Досліджено спектральні характеристики поглинання в УФ-видимому діапазоні наночастинок золота, данні дзета потенціалу та розподілення за розчином (методом динамічного світлорозсіювання) отриманих після модифікації наночастинок, що дозволило прогнозувати повне/часткове заміщення карбоксильних груп стабілізаторів на тіолову ($-SH$) групу. У статті здійснено дослідження щодо ефективності визначення тринітротолуолу (ТНТ) у водному розчині із використанням модифікованих β -цистеаміном наночастинок золота. Одержані в результаті модифікації нанодисперсії демонструють високу вибірковість до тротилу завдяки формуванню класичного комплексу Мейзенгеймера, який утворюється в результаті переносу заряду від електронодонорної аміногрупи ($-NH_2$) β -цистеаміну до електронodefіцитної нітрогрупи в структурі тротилу. За досліджуваних модельних умов поглинання УФ-видимого випромінювання при $\lambda=650$ нм показало лінійну залежність від концентрацій ТНТ в діапазоні 0,02-0,12 мкг/мл ($R^2 = 0,89$). Встановлено основні валідаційні характеристики кількісного визначення ТНТ із використання розробленого нанозонда: межа виявлення ($LOD=0,0085-0,00855$ мкг/л); ($LOQ= 0,0257-0,0268$ мкг/л). Використовувався аналітичний калькулятор GREEnness, комплексний підхід до оцінки цього методу, який використовує 12 принципів зеленої аналітичної хімії, перетворених в єдину шкалу від 0 до 1. Потенційне використання методів у лабораторіях контролю якості, цінних для фармацевтичного сектору.

Ключові слова: дисперсії наночастинок, золото, модифікування, сенсор, нанозонд, колориметрія, агрегація, полютант, моніторинг, водне середовище.

Постановка проблеми. 2,4,6-Тринітротолуол (ТНТ) нітроароматична сполука, який широко використовується в військовій, авіаційній та цивільній промисловості [1-2]. Розчинність тротилу у воді сильно залежить від рН і температури навколишнього середовища, і в різних джерелах згадується діапазон 100-200 мг/л [1-2]. Відтак,

оскільки ТНТ помірно розчинний у воді, то здатен мігрувати через поверхневий шар ґрунту, що призводить до забруднення підземних вод та ґрунтів через свою біологічну токсичність та стійкість [3, 4]. Посилаючись на звіт, опублікований Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA), тротил класифікується як забруд-

нююча речовина в концентраціях вище 2 мкг/л (8,8 нМ) [5].

Наразі відомо значну кількість методів для виявлення ТНТ різної кількості і у різних середовищах, які здебільшого ґрунтуються на використанні рідинної хроматографії в поєднанні з мас-спектрометрією, газової хроматографії з мас-спектрометрією, високоефективної рідинної хроматографії [1-5] та електрохімічних методів [1-5]. Однак інструментальні методи аналізу потребують громіздкого та складного обладнання, кваліфікованих техніків і тривалих процедур попередньої обробки зразків, що робить їх непридатними для економічно ефективного та експрес-виявлення ТНТ на місці.

У зв'язку з цим, продовжується розробка нових методів, які б відповідали вимогам простоти, швидкості, високої чутливості, селективності для виявлення слідової кількості ТНТ у водних середовищах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження як закордонних [1-5, 6-11], так і вітчизняних фахівців щодо розробки методів та матеріалів для оперативного виявлення/визначення ТНТ показують, що особливу перспективу мають скринінгові системи з різним складом, у яких використовуються наноматеріали (наночастинки та матеріали з їх складом – гідрогелі, папір, плівки тощо) та окремо наночастинки (моно-та бікомпозити), модифіковані різними функціональними сполуками для селективного виявлення ТНТ [9, 11].

Глобальний ринок наносенсорів за маркетинговими дослідженнями [12] оцінюється в 0,85 мільярда доларів США у 2024 році та, за прогнозами, зросте з 0,92 мільярда доларів США у 2025 році до 2,04 мільярда доларів США до 2034 року, демонструючи сукупний річний темп зростання (CAGR) на рівні 9,2% протягом прогнозованого періоду (2025-2034).



Рис. 1. Сучасний стан ринку та прогноз ринку наносенсорів [12]

Механізм дії наносенсорів, як правило, базується на взаємодії груп-функціоналізаторів цих матеріалів з сполукою-аналітом ТНТ, що забезпечує можливість його ефективного виявлення за допомогою різних аналітичних методів. Як свідчать наукові джерела, однією з груп таких сполук є аміни [1, 6, 7], як амінотіол, він демонструє низку унікальних властивостей, що роблять його придатним для застосування в електрохімічних та колориметричних сенсорах [13]. Повідомляється [10] про економічно ефективний паперовий електрохімічний сенсор для виявлення тротилу з використанням наночастинок ядро-оболонка $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Au}$, модифікованих цистеаміном. Автори роботи [6] використовуючи датчик Au НЧ з цистеїном для виявлення ТНТ в діапазоні концентрацій $4 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-10}$ М ТНТ, яка логарифмічно корелювала з концентрацією аналіту. Колориметричний механізм таких сенсорів виявлення зазвичай базується на зміні кольору, що виникає через агрегацію наночастинок або сильне плазмонне посилення, яке з'являється в результаті електростатичної взаємодії між сенсором і аналізованою речовиною [11-14, 15, 16]. Також наразі відомо [1-5, 11, 13], що колориметрична активність таких сенсорів безпосередньо залежить від параметрів наноструктур (таких як розмір, форма, стабільність дисперсності тощо) і стабілізаторів-функціоналізаторів, які використовуються в процесі [8-10]. Тому саме підбір складу функціоналізатора та дослідження його ефективності, поряд із визначенням впливу параметрів функціоналізатора (концентрації, об'єму тощо) та наночастинок (розміру, дисперсності та первинного стабілізатора тощо), є одними з ключових факторів при розробці сенсорних систем, зокрема колориметричного детектування.

Постановка завдання. Метою роботи було здійснити функціоналізацію плазмохімічно синтезованих наночастинок золота з різними типами стабілізаторів (цитрат натрію та кармбоксиметилцелюлоза), шляхом модифікування цистеаміном (2-аміноетантіол) та визначення їх сенсорної активності для колориметричного виявлення нітроароматичних сполук (на прикладі ТНТ) у водному середовищі (модельних водних розчинах).

Виклад основного матеріалу.

Методика експериментальних досліджень

Одержання стабілізованих колоїдних розчинів наночастинок золота НЧ здійснювали шляхом обробки суміші попередньо одержаних водних розчинів прекурсуру $[\text{Au}^{3+}]$ (0,1-3,0 ммоль/л) із солі тетрахлороаурату водню HAuCl_4 та реагенту-стабілізатору [СТАБ] = цитрат натрію, КМЦ при

мольному співвідношенні $[Me]:[СТАБ] = 1$ розрядом плазми, що формується в реакторі [16]. Параметри формування плазмового розряду: сила струму $I = 120$ мА і $P = 0,8$ МПа. Концентрація Au^{3+} . Загальний об'єм розчину $V = 40$ мл.

Наночастинки золота (НЧ), функціоналізовані β -цистеаміном, були отримані шляхом додавання 20 мкл β -цистеаміну (1,5 мМ) до 2 мл колоїдного розчину наночастинок $C_{Au}/C_{цис}$: 2/1. Реакційну суміш витримували при кімнатній температурі протягом 12 годин з метою забезпечення ефективної адсорбції функціональних груп β -цистеаміну на поверхню наночастинок золота. Надлишок не зв'язаного β -цистеаміну було вилучено шляхом центрифугування при 8000 об/хв протягом 10 хвилин. Після відділення супернатанту, отриманий осад повторно диспергували у дистильованій воді для подальшого використання в експериментальних дослідженнях. Поглинання одержаних дисперсій реєстрували за допомогою спектрофотометра UV-Vis UV-5800PC з використанням кварцових кювет.

Дослідження колориметричної активності одержаних нанодисперсій здійснювали відповідно до наступної методики [12]. Спочатку робочий розчин 2,4,6-тринітротолуол (тротил) (20 мМ) готували з 1:1 ацетон–вода. Стандартні водні розчини ТНТ (досліджуваної концентрації) були отримані шляхом серійного розведення робочого розчину ТНТ. Потім 1,0 мл ($V=1$ мл) стандартних водних розчинів ТНТ з різними концентраціями ТНТ в діапазоні 0-25 мкг/мл (0,022-0,11 мМ) були внесені до зразка сенсора ($V=0,3$ мл), який інкубували (витримували) протягом 15 хвилин при кімнатній температурі за присутності буферного розчину Na_2CO_3 - $NaHCO_3$ ($pH = 11,0$, 0,2 М). Через 15 хвилин реакції зміни поглинання зразків (A від. од.) визначали при $\lambda=520$ -650 нм. Схематичне зображення методики одержання модифікованих наночастинок та їх застосування як сенсорів наведено на рис. 2.

Для визначення діапазону лінійності використовували УФ-спектрофотометричну методику аналізу (графік, побудований в координатах: A , (оптична густина розчину) – C , мкмоль/л (концентрація розчину ТНТ). Для здійснення кількісної оцінки було визначено скореговане значення поглинання (A'), за рівнянням рівняння (1):

$$A' = (A_{650}/A_{520})_z - (A_{650}/A_{520})_k \quad (1)$$

При наведеному вище методі розрахунку значення абсорбції зразок не залежав від кількості наночастинок, а калібрувальне рівняння було

отримано з корегованим значенням поглинання ($A'_{650/520}$). Значення межі виявлення (LOD) та кількісного визначення (LOQ) розраховували на основі параметрів градуювальної прямої (S_a – стандартне відхилення вільного члена та b – тангенса нахилу).

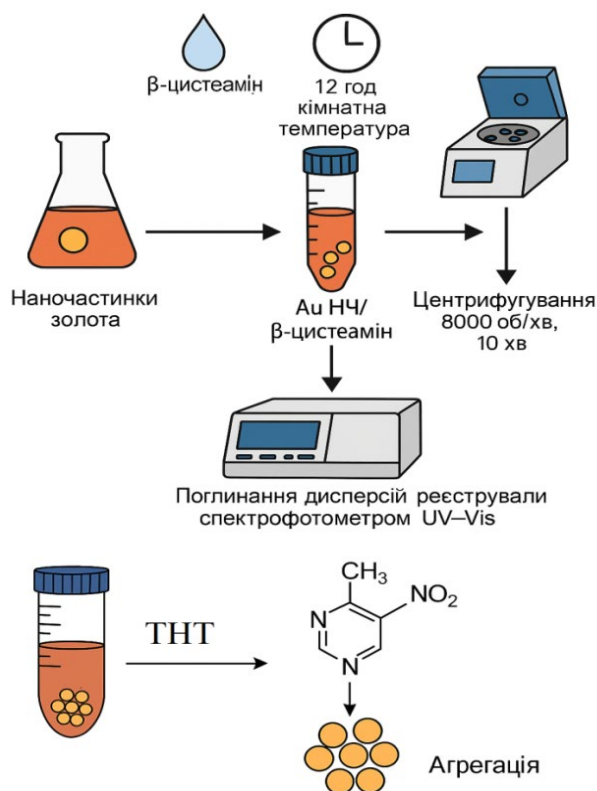


Рис. 2. Схема модифікування наночастинок та виявлення ТНТ

Для аналізу маркеру екологічності розробленого сенсора було використано AGREEprep. AGREEprep – це нова аналітична метрика екологічності, опублікована Wojnowski et al. у 2022 році та зосереджується на підготовці зразків для аналізу. Оцінку за допомогою AGREEprep легко виконати як для введення значень, так і для виведення даних. Безкоштовну версію програмного забезпечення можна отримати за адресою <https://mostwiedzy.pl/AGREE>. У цій аналітичній метриці екологічності кожен із 10 критеріїв має вагу, яка вносить свій внесок у загальну оцінку. Дослідники можуть вносити зміни до ваги для кожного критерію, якщо вони належним чином обґрунтовують ці зміни. Результатом оцінювання є барвіста круга піктограма з цифрою в центрі. Загальний бал, який також коливається від 0 до 1, де 1 означає ідеальний бал, обчислюється шляхом зважування значень кожного критерію. Якщо

кумулятивний результат перевищує 0,5, це вважається зеленим методом аналізу [17].

Отримані експериментальні результати. В попередніх роботах авторів [17, 19] представлено комплекс даних, щодо ефективності плазмохімічного синтезу наночастинок золота, стабілізованих цитратом натрію та карбоксиметилцеллозою з контрольованими фізико-хімічними параметрами розміром, дисперсністю, стабільністю: $d_{\text{сер}} = 30-50$ нм в широкому діапазоні вихідних концентрацій Au^{3+} (0,03-2,5 ммоль/л), $\zeta = -41-48,5$ мВ (рис. 3 а, б). З метою функціоналізації плазмохімічно одержаних дисперсій та формування їх колориметричної активності до селективного виявлення нітроароматичної сполуки (ТНТ) було здійснено модифікування їх поверхні β -цистеаміном відповідно до методики [12]. Відтак, модифікування наночастинок золота цистеаміном у присутності стабілізаторів цитрату натрію/КМЦ, здійснюється шляхом, частково витіснення/доповнення стабілізуючого шару цитрату цистеаміном (2-аміноетантіол), який, як відомо [1, 6, 7-10],

міцно зв'язується із золотом через свою тіолову ($-\text{SH}$) групу, тоді як група $-\text{NH}_2$ залишається «відкритою» для подальшої кон'югації з аналітом. Ступінь заміщення, за оцінками різних джерел [1-6, 10], залежить від тривалості модифікування ($\tau = 12-24$ год.). З попередніх досліджень [16, 18] відомо, що поверхневий заряд наночастинок золота, стабілізованих цитратом та КМЦ (цитрат/КМЦ- AuНЧ), характеризується значним негативним значенням ($-41,3 \div -48,5$ мВ (табл. 1), що обумовлено наявністю карбоксильних груп ($-\text{COO}^-$) на поверхні AuНЧ . Визначення значення дзета потенціалу після модифікації цистеаміном свідчить про зсув дзета-потенціалу у напрямку до нейтральних або позитивних значень, що пов'язано з присутністю протонованих аміногруп ($-\text{NH}_3^+$). Отримані значення дзета-потенціалу на рівні $-27,9$ мВ для КМЦ та до $25,8$ мВ для цитрату натрію свідчить про заміну первинних лігандів на цистеамінові або можливе співіснування обох типів лігандів на поверхні наночастинок (табл. 1, рис. 3).

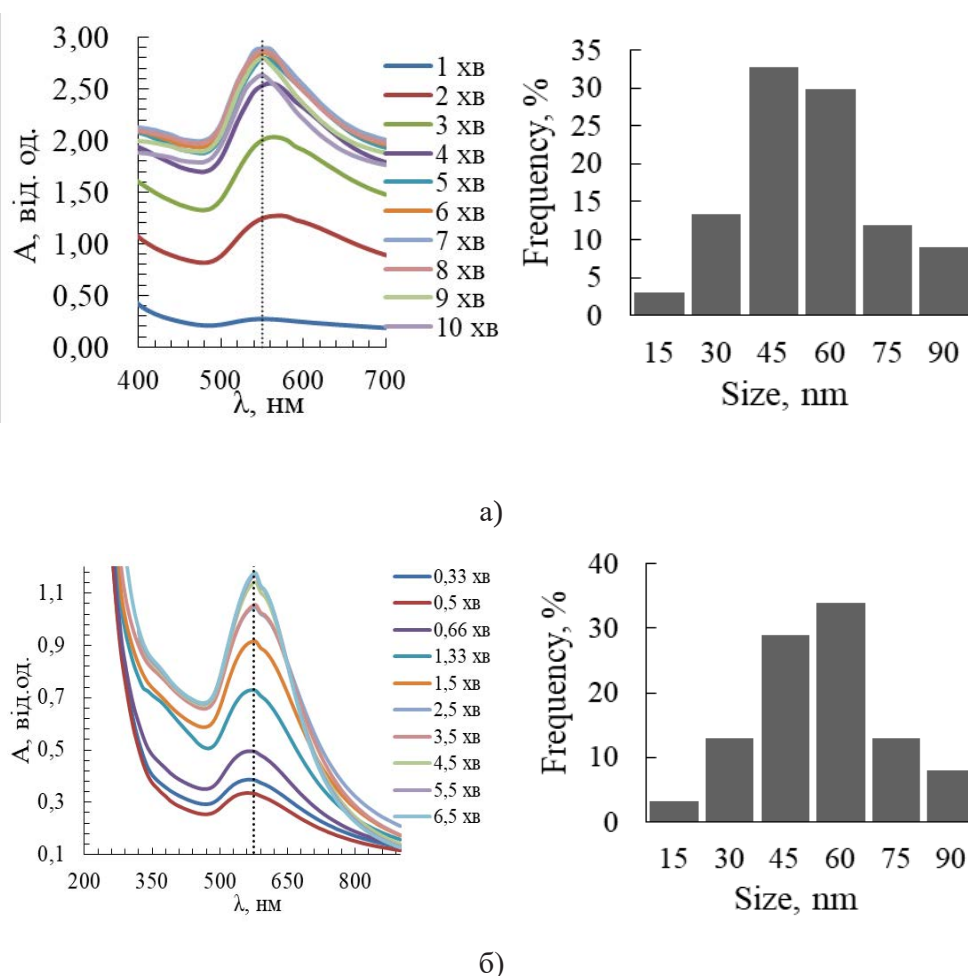


Рис. 3. Спектри плазмохімічно синтезованих НЧ золота, стабілізованих цитратом (а) та КМЦ (б)

Таблиця 1

Характеристика плазмохімічно синтезованих та модифікованих наночастинок золота

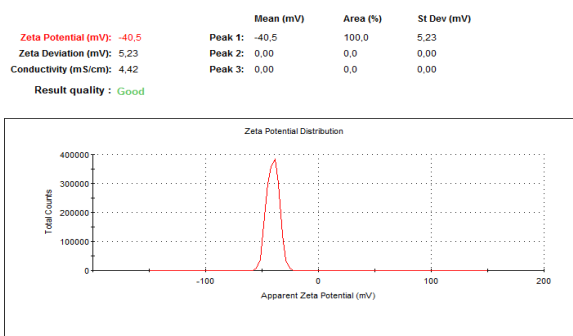
Зразок	До модифікування		Після модифікування	
	ζ-потенціал, мВ	d _{сеп} , нм	ζ-потенціал, мВ	d _{сеп} , нм
Ау-цитрат/Цистеамін	-48,5	45±5,0	25,8	48,3
Ау-КМЦ/Цистеамін	-40,5	50±3,8	-27,5	53,5

Було проведено дослідження щодо додавання до попередньо синтезованих цитрат або КМЦ-стабілізованих НЧ лише β-цистеаміну або ТНТ і було встановлено, що це не призводить до агрегації Ау НЧ. Спектри характеризуються піком ППР при $\lambda=550$ нм, що відповідає НЧ з середнім розміром $\lambda=40-50$ нм. В обох випадках не спостерігається суттєвих змін характеру спектру і колір розчину залишався фіолетовим, що свідчить про те, що ТНТ, ймовірно, не спричиняє агрегацію цитрат/КМЦ-стабілізованих Ау НЧ, а додавання цистеаміна фактично призводить до утворення цистеамін-стабілізованих Ау НЧ через формування ковалентного зв'язку Ау-S. В результаті додавання аналіту ТНТ до цистеамін-модифікованих Ау НЧ, колір отриманої суспензії змінюється на синій, з характерним формуванням піку на спектральній кривій у довгохвильовій області ($\lambda=620-650$ нм), що вказує на агрегацію Ау НЧ. Додатковим підтвердженням формування агрегатів НЧ є данні розподілення наночастинок методом динамічного світлорозсіювання (рис. 4).

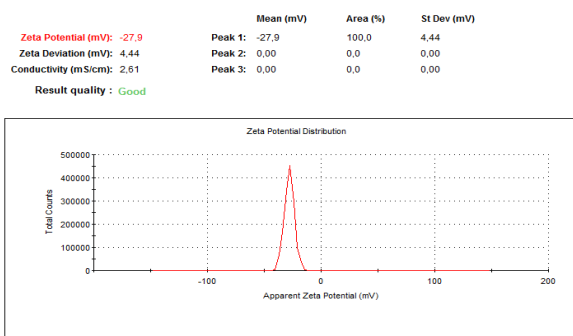
Здійснено дослідження сенсорної (колориметричної) активності одержаних модифікованих дисперсій наночастинок золота, стабілізованих цитратом натрію/КМЦ при колориметричному виявленні ТНТ в водних розчинах (рис. 5). Для моніторингу змін поверхневого плазмонного резонансу було визначено поглинання при довжині хвилі $\lambda=650$ нм. Під час збільшення поглинання при $\lambda=650$ нм спостерігалось зменшення поглинання початкового піку поверхневого плазмонного резонансу при $\lambda=525$ нм.

Встановлено основні валідаційні характеристики кількісного визначення ТНТ із використання розробленого нанозонда: межа виявлення (LOD=0,0085-0,00855 мг/л); (LOQ=0,0257-0,0268 мг/л).

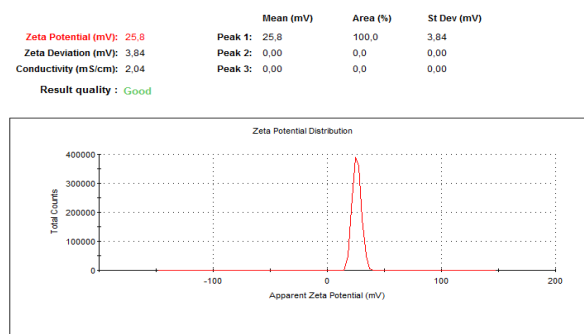
В табл. 2 наведені основні валідаційні характеристики кількісного визначення ТНТ: інтервал лінійності градуального графіку у діапазоні концентрацій; коефіцієнти регресії рівняння градуального графіку, які розраховані методом найменших квадратів, межа виявлення аналіту, межа кількісного визначення.



а)



б)



в)

Рис. 4. Дзета потенціал немодифікованих (а) та функціоналізованих цистеаміном (2-аміноетантіол) (б – Ау-цитрат/Цистеамін, в – Ау-КМЦ/Цистеамін) плазмохімічно одержаних наночастинок золота

Завдяки впровадженню ідей сталого розвитку, ефективності та безпеки в процеси, одночасно задовольняючи аналітичні та фінансові вимоги, Зелена аналітична хімія (ЗАХ) повністю змінила методологію підготовки зразків. Зелена

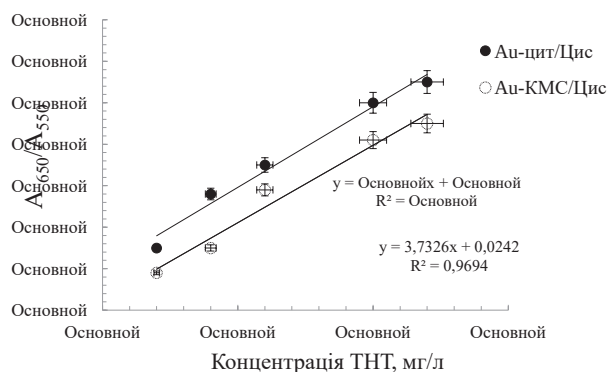
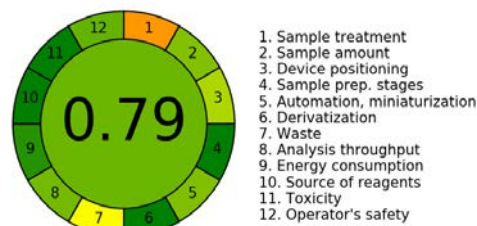


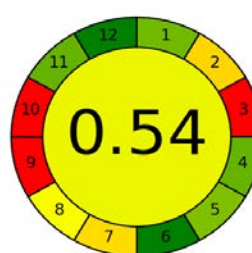
Рис. 5. Колориметричне визначення ТНТ із використанням наносенсора – модифікованих наночастинок золота: графік залежності A_{650}/A_{550} від концентрацій ТНТ

аналітична хімія прагне створити аналітичні процедури, безпечніші як для навколишнього середовища, так і для здоров'я людини. Вона наголошує на зменшенні використання та токсичності реагентів, мінімізації утворення відходів та зниженні споживання енергії. Ключові фактори також включають спрощення процедурних кроків, сприяння мініатюризації та розвиток автоматизації. Для оцінки впливу аналітичного методу на навколишнє середовище необхідні спеціальні інструменти. У нашому випадку ми використали калькулятор аналітичної GREEnness, який є комплексним, гнучким та зручним інструментом. Цей підхід оцінює різні аспекти екологічності на основі 12 принципів зеленої аналітичної хімії. Кожному критерію присвоюється бал за єдиною шкалою від 0 до 1, а кінцевий бал розраховується шляхом зважування цих критеріїв відповідно до їхньої значущості. Результат представлений у вигляді піктограми, що відображає як загальний бал, так і ефективність методу за кожним окремим критерієм. Піктограма оцінки зеленості колориметричного методу для модифікованих Au НЧ представлена на рис. 5.

Цей метод є екологічно чистим, оскільки передбачає мінімальне використання хімікатів та неінвазивний відбір проб. Крім того, він не



а)



б)



в)

Рис. 6. Піктограма оцінки екологічності колориметричного методу виявлення ТНТ при використанні модифікованих Au НЧ (а), рідинною хроматографією-мас-спектрометрією (б), газовою хроматографією-мас-спектрометрією (в)

вимагає складного, енергоємного обладнання, що знижує вуглецевий слід. Процес колориметричного детектування забезпечує візуальне зчитування, що зменшує потребу в додаткових приладах та зменшує утворення відходів. Оцінка становить 0,79. На піктограмі AGREE оцінки, що відповідають принципам GAC 1, 8 та 11, є досить низькими, тоді як ефективність для принципів 2, 4, 6 та 9 є відмінною. Можна зробити висновок, що метод є «зеленим». Також можна сказати, що РХ-МС – це більш ресурсоємний метод, що вимагає розчинників, реагентів та високоякісного обладнання. Він є високочутливим та точним, але високе енергоспоживання обладнання та хімічні відходи від розчинників та підготовки зразків знижують його екологічність. ГХ-МС, як і РХ-МС, є високоточним методом, але також пов'язаний зі значними екологічними проблемами через вико-

Таблиця 2

Колориметрична активність функціоналізованих наночастинок золота

Зразок НЧ золота	Аналіт	Лінійний діапазон, мкг/мл	Значення межі виявлення LOD, мг/л	Межа кількісного визначення LOQ, мг/л	Коефіцієнти варіації, у відсотках (N = 3).
Au-Цитрат/Цистеамін	ТНТ	0,02-0,12	0,0085	0,0257	1,1
Au-КМЦ/Цистеамін			0,0088	0,0268	1,2

ристання легких розчинників, енергоспоживання та вимогу до тривалої обробки зразків.

Висновки. Здійснено синтез наночастинок золота із використанням над рідинного плазмового розряду при різних концентраціях $[Au^{3+}]$ та тривалості обробки анодним плазмовим розрядом. Одержані наночастинки характеризуються смугою поверхневого плазмонного поглинання в межах $\lambda=530-600$ нм, що характерно наночасткам з середнім розміром в діапазоні $30-75\pm 5,5$ нм. Результати досліджень свідчать, що розмір наночастинок золота можна регулювати, змінюючи початкову концентрацію $[Au^{3+}]$ солі перкурсорів від 0,3 до 2,5 ммоль/л та тривалість синтезу. Встановлено, що при досліджених концентраціях Au^{3+} обробка плазмовим розрядом протягом

3-10 хвилин призводить до утворення стабільних наночастинок золота різного розміру та переважно сферичної форми із значенням дзета-потенціалу до $\sim -48,5\div -40,5$ мВ. Досліджено сенсорні (колориметричні) властивості отриманих наночастинок золота для колориметричного визначення 2,4,6-тринітротолуолу у водних розчинах. За досліджуваних модельних умов поглинання УФ-видимого випромінювання при $\lambda=650$ нм показало лінійну залежність від концентрацій ТНТ в діапазоні 0,02-0,12 мкг/мл ($R^2 = 0,89$). Встановлено основні валідаційні характеристики кількісного визначення ТНТ із використання розробленого нанозонда: межа виявлення ($LOD=0,0085-0,00855$ мг/л); ($LOQ=0,0257-0,0268$ мг/л).

Список літератури:

1. Şen F. B., Bener M., Aşçı Y. S., Lalikoglu M., Apak R. Selective determination of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) with cysteamine in deep eutectic solvents. *Journal of Molecular Liquids*. 2022. Vol. 367. Art. 120556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120556>
2. Zhang X., Luo Y., Xia L., Song Y., Li W., Kong L., Liu Y., Shen C., Huang C., Chu Y. A study on the determination of the metabolites of 2,4,6-trinitrotoluene using a dual-drift tube ion mobility spectrometer. *Talanta*. 2025. Vol. 281. Art. 126857. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126857>
3. Jiang Y., Zhao H., Zhu N., Lin Y., Yu P., Mao L. A simple assay for direct colorimetric visualization of trinitrotoluene at picomolar levels using gold nanoparticles. *Angewandte Chemie*. 2008. Vol. 120, no. 45. P. 8729–8732. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.200804066>
4. Erçağ E., Üzer A., Apak R. Selective spectrophotometric determination of TNT using a dicyclohexylamine-based colorimetric sensor. *Talanta*. 2009. Vol. 78(3). P. 772–780. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.12.042>
5. Zhao Y., Pan M., Liu F., Liu Y., Dong P., Feng J., Shi T., Liu X. Highly selective and sensitive detection of trinitrotoluene by framework-enhanced fluorescence of gold nanoclusters. *Anal. Chim. Acta*. 2020. Vol. 1106. P. 133–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.01.055>
6. Devi S., Singh B., Paul A. K., Tyagi S. Highly sensitive and selective detection of trinitrotoluene using cysteine-capped gold nanoparticles. *Anal.* 2016. Vol. 8 (22). P. 4501–4507. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6AY00349C>
7. Ditta S.A., Yaqub A., Tanvir F. et al. Gold nanoparticles capped with L-glycine, L-cystine, and L-tyrosine: toxicity profiling and antioxidant potential. *J Mater Sci*. 2023. Vol. 58. P. 2814–2837. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08209-9>
8. Aamir M., Irum S., Siddiq A., Batool H. M., Ahmed N., Awais M. H., Ali S. A novel method development and validation for determination of 2,4,6-Trinitrotoluene and its metabolites on LC-MS/MS. *Anal. Biochem*. 2022. Vol. 638, AD 114496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2021.114496>
9. Milligan K., Shand N. C., Graham, D., Faulds K. Detection of multiple nitroaromatic explosives via formation of a Janowsky complex and SERS. *Analytical Chemistry*. 2020. Vol. 92(4). P. 3253-3261. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b05062>
10. Adegoke O., Nic Daeid N. Colorimetric optical nanosensors for trace explosive detection using metal nanoparticles: advances, pitfalls, and future perspectives. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2021. Vol. 5(3). P. 367–379. DOI: <https://doi.org/10.1042/ETLS20200281>
11. Soltani-Shahrivar M., Afkhami A., Madrakian T. Design and optimization of a cost-effective paper-based voltammetric sensor for the determination of trinitrotoluene (TNT) utilizing cysteamine-linked $Fe_3O_4@Au$ nanocomposite. *Talanta*. 2024. Vol. 274. AD 126041 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126041>
12. Dhapte Aarti. Nanosensors Market Research Report Information, By Type (Chemical and Bacterial, Optical, Synthetic, Electrochemical, Mechanical), By Application (Robotics, Healthcare, Food & Beverage, Automotive, Petroleum), By Technology (Wind Turbines, Fuel Cells, Micro Turbines) – Forecast till 2034 // *Aarti Dhapte. – Market Research Future* URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/nanosensors-market-1117> (дата звернення 10.07.2025).

13. Peveler W.J., Jaber S.B., Parkin I.P. Nanoparticles in explosives detection – the state-of-the-art and future directions. *Forensic Sci Med Pathol*. 2017. Vol. 13. P. 490–494. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12024-017-9903-4>.
14. Chohra M., Yaddaden C., Berouaken M. et al. Electrochemical Detection of 2,4,6-Trinitrotoluene on L-Cysteine-Modified Porous Silicon Electrode in Dimethyl Sulfoxide Solution. *Silicon*. 2024. Vol. 16. P. 3111–3120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02885-1>.
15. Serafinelli C, Fantoni A, Alegria ECBA, Vieira M. Plasmonic Metal Nanoparticles Hybridized with 2D Nanomaterials for SERS Detection: A Review. *Biosensors*. 2022. Vol. 12 (4). P. 225. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios12040225>.
16. Barkheh H., Zeinoddini M., Ranjbar B., Xodadadi N. A novel strategy for trinitrotoluene detection using functionalized gold nanoparticles. *Journal of Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 76(4). P. 459–465. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1061934821040031>.
17. Skiba M., Zaporozhets J., Vorobyova V. Gold nanoparticles with natural polymer synthesized by plasma–liquid interactions: Size-control, characterization and colorimetric detection of melamine based on the size effect of gold nanoparticles. *Nano-Structures and Nano-Objects*. 2024. Vol. 37. AD 101113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101113>.
18. Wojnowski, W., Tobiszewski, M., Pena-Pereira, F., Psillakis, E.. AGREEprep – Analytical greenness metric for sample preparation. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2022. Vol. 157. AD 116553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116553>.

Skyba M.I., Vorobiova V.I., Skyba Yu.M. MODIFICATION OF GOLD NANODISPERSIONS WITH CYSTEAMINE AND STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF APPLICATION FOR THE RAPID DETECTION OF POLLUTANTS: TRACE AMOUNTS OF 2,4,6-TRINITROTOLUENE (TNT) IN AQUEOUS SOLUTIONS

Currently, the development of methods, approaches and materials for sensitive and selective detection of nitroaromatic explosives is relevant for solving certain issues in the field of ensuring human health, preserving sustainable environmental development, public safety and military issues. The application of previously plasma-chemically synthesized dispersions of nanogold stabilized by sodium citrate and carboxymethylcellulose was carried out and the methods of their modification with β -cysteamine were presented. The spectral characteristics of absorption in the UV-visible range of gold nanoparticles, the zeta potential data and the distribution in solution (by the dynamic light scattering method) obtained after the modification of nanoparticles were studied, which allowed predicting the complete/partial mixing of the carboxyl groups of stabilizers with the thiol ($-SH$) group. The article studies the efficiency of determining trinitrotoluene (TNT) in aqueous solution using β -cysteamine-modified gold nanoparticles. The nanodispersions obtained as a result of the modification demonstrate high selectivity for TNT due to the formation of a classical Meisenheimer complex, which is formed as a result of charge transfer from the electron-donating amino group ($-NH_2$) of β -cysteamine to the electron-deficient nitro group in the TNT structure. Under the studied model conditions, the absorption of UV-visible radiation at $\lambda=650$ nm showed a linear dependence on TNT concentrations in the range of 0.02-0.12 $\mu\text{g/ml}$ ($R^2 = 0.89$). The main validation characteristics of the quantitative determination of TNT using the developed nanoprobe were established: detection limit ($LOD=0.0085\text{-}0.00855$ mg/l); ($LOQ= 0.0257\text{-}0.0268$ mg/l). The analytical calculator GREENness was used, a comprehensive approach to the evaluation of this method, which uses 12 principles of green analytical chemistry, converted into a single scale from 0 to 1. Potential use of the methods in quality control laboratories, valuable for the pharmaceutical sector.

Key words: nanoparticle dispersions, gold, modification, sensor, nanoprobe, colorimetry, aggregation, pollutant, monitoring, aquatic environment.

Дата надходження статті: 10.07.2025

Дата прийняття статті: 26.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стеренчук С.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ФЛАВОНОЇДІВ У РОСЛИННИХ ЕКСТРАКТАХ МЕТОДОМ СПЕКТРОФОТОМЕТРІЇ

Існує високий попит на дослідження та застосування рослинної сировини у науці. Це зумовлено її широкою розповсюдженістю та низькою собівартістю. Дослідження на вміст флавоноїдів дозволяють виокремити найефективнішу біодоступну сировину з-поміж інших, адже відомо про ряд корисних властивостей цих сполук: антиоксидантну, протимікробну, протизапальну, заспокійливу та сонцезахисну дії.

Відомо про 2 шляхи ідентифікації флавоноїдів – кількісний та якісний аналіз. Якісний аналіз підтверджує наявність флавоноїдів у рослині, та є досить малоінформативним, кількісний же аналіз дозволяє визначити не лише наявність а й перелік та вміст флавоноїдів у сировині. Серед кількісного аналізу виокремлюють спектрофотометричний аналіз та хроматографічний. Останній є дороговартісним та складним у виконанні, потребує рідкісного обладнання та створення методології.

Метою роботи було визначення кількості флавоноїдів у рослинних екстрактах горобини та бузини спектрофотометричним методом. Досліджували екстракти квітів бузини 5:1 та ягід горобини 10:1 отримані від Науково-виробничої компанії “Віларус”. Екстракти отримували шляхом ліофілізації та змішування із розчинником етанолом. Після цього проводили ультразвукову екстракцію та фільтрували шляхом центрифугування та пропускання через порову мембрану. Для отримання сухого концентрату розчин випарували. Перед визначення вмісту флавоноїдів концентрат помістили у вологомір для досягнення постійної маси. Дослідження проводили методом абсорбційної спектрофотометрії з використанням алюмінію хлориду ($AlCl_3$). Загальний вміст флавоноїдів виражали в рутиновому еквіваленті і визначали за допомогою калібрувальних графіків залежності абсорбції від концентрації рутину в розчині.

Отримані результати досліджень свідчать про високий вміст флавоноїдів у обох зразках, проте більша кількість у екстракті квітів бузини – 182 ± 3 мг/г сухого екстракту. Можемо зробити висновок, що дана рослинна сировина має високе практичне значення для багатьох галузей хімії та є перспективною для подальших досліджень, а також, потребує збереження природних ресурсів її сировини.

Ключові слова: спектрофотометричний метод, рослинні екстракти, горобина, бузина, флавоноїди.

Постановка проблеми. Відомо, що флавоноїди володіють широким спектром властивостей: заспокійливою дією, протизапальною [1, 2], мають антибактеріальний ефект [3, 4], сприяють загоєнню ран [5, 6], а також володіють антидіабетичною, судиннорозширювальною діями [7]. На додачу, уповільнення старіння шляхом інгібування еластази та колагенази [8], ефективність при поглинанні вільних радикалів, зменшення вироблення ROS (ROS – активні форми кисню), пом'якшення фотостаріння та запалення шкіри, спричиненого UVB (UVB коротка ультрафіолетова хвиля) [9] та сонцезахисний ефект [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16].

Питання ефективності використання флавоноїдів, отриманих із рослин, залишається актуальним останні роки. Це зумовлене рядом причин:

- Високою біодоступністю рослинної сировини;

- Розповсюдженістю у природі;
- Низькою матеріальною вартістю;
- Сприятливими кліматичними умовами.

Тому існує потреба у стандартизації та виявленні БАР (Біологічно активних речовин) у рослинній сировині, зокрема вмісту флавоноїдів. Важливо щоб процес визначення був простим, ефективним, безпечним та економічно доступним задля отримання найкращого результату та високих показників. Визначення вмісту флавоноїдів дозволить глибше зрозуміти механізм їх дії та дослідити вище описані властивості окремо вибраної сировини, а також допоможе оцінити хімічний та фармакологічний потенціал рослинної сировини. Визначення вмісту флавоноїдів дає змогу також встановити доцільність подальшого наукового дослідження обраної сировини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.*Рослинна сировина*

Особливої уваги заслуговують такі зразки сировини, як горобина та бузина.

Sorbus aucuparia L. – з лат. горобина звичайна є рослиною, стійкою до зміни клімату та непривабливою до ґрунту, вона може рости у бідних поживними речовинами середовищах. Переробка ягід у екстракт приводить до отримання близько 20-30% екстракту із вихідної сировини, що робить її економічно привабливою сировиною для подальших досліджень [17].

Плоди горобини є джерелом полісахаридів, органічних кислот, мінералів, і звісно ж, поліфенолів. Деякі дослідження свідчать, що вміст каротиноїдів у горобині ідентичний їх вмісту у моркві [18], а також, високий вміст вітамінів В2, Е, С аналогічно до вмісту полуниці [18].

Горобину, що росла на Балканському півострові зібрали та дослідили на вміст фенольних кислот, виявивши велику кількість хлорогенової та неохлорогенової кислоти, які становили 50-60% від загальної кількості фенолів даної ягоди. Їх вміст можна порівняти лише з зернами кави арабіки – найбагатшого джерела фенольних кислот [19]. В соці горобини виявили 8 флавонолів – 6 з яких були формами кверцетину. Загальний вміст флавонолів в соці становив 291 mg L^{-1} [20]. Литовські вчені знайшли також фенольні кислоти (катехін, епікатехін, метиловий ефір ферулової кислоти), флавоноли (кверцетин, ізокверцетин, гіперозид, рутин, катехін, епікатехін) та антоціани (переважно ціанідин або пеларгонідинглікозиди) у водному екстракті горобини [21]. Поліфеноли, що містяться в горобині виявляють потужний антиоксидантний, протидіабетичний, протизапальний, протимікробний ефекти і є також корисними при захворюваннях серця, печінки та судин [22].

Вісім флавонолів було виявлено в соці горобини – кверцетини та кемферолу глікозиди [20], а також 23 флавоноїди, включаючи похідні апігеніну та лютеоліну у фракціях листя горобини [23]. Існують дані про вміст флавоноїдів із сировини Ботанічного саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара 2020 року – у плодах усіх видів горобини кількість флавоноїдів була більшою у шкірці, ніж у м'якоті [24], з чого можемо зробити висновок, що саме шкірка плодів горобини є найкращим сировинним матеріалом для подальших досліджень. Єдиною токсичною частиною горобини є насіння, адже воно містить в своєму складі парасорбційну кислоту, яка у надмірних кількостях викликає розлад шлунка, а також, ціано-

генний глікозид – який може виділяти ціанід водню та навіть спричиняти смерть [25].

Такою ж розповсюдженою рослиною у більшій частині Європи є бузина, вона багата на вуглеводи, жири, білки, органічні кислоти та мінерали. Також містить високий вміст поліфенолів. Хімічний склад *Sambucus nigra* багатий і залежить від різних факторів, таких як сорт, розташування, стадія дозрівання та кліматичні умови. Найвищий вміст білка та вуглеводів міститься у ягодах, жири накопичуються в насінні, а мінерали у шкірці. Плоди *Sambucus nigra* (з лат. екстракт бузини) є важливим джерелом фенольних сполук – саме в плодах їх вміст значно вищий, ніж в інших частинах рослини [26]. Квіти бузини містять більше фенольних сполук (рутину, ізокверцитину та астрагаліну), ніж ягоди або листя [27].

Бузина є хорошим джерелом антоціанів у порівнянні з іншими рослинами, зокрема вона містить ціанідин-3-глюкозид та ціанідин-3-самбубіозид. Антоціани є багатофункціональними сполуками – вони використовуються і як барвники, і зменшують окислювальний стрес, поглинаючи вільні радикали [28].

Sambucus nigra L. містить у своєму складі велику кількість поліфенолів і володіє заспокійливою, протизапальною [1, 2] та антиоксидантною дією [29], а також, зменшує УФ-індуковане старіння. Існують дослідження про вплив екстракту плодів бузини на UVB-індуковані кератиноцити людини. Даний екстракт продемонстрував ефективність при поглинанні вільних радикалів та зменшував вироблення активних форм кисню ROS, а також, сприяв синтезу проколагену I типу, зарекомендував себе як пом'якшувач фотостаріння та запалення шкіри, спричиненого UVB [9]. В екстрактах бузини переважають такі фенольні кислоти: хлорогенова, синапінова та т-циннамова, а також, рутин і кверцетин виступають домінуючими флавоноїдами [3]. Галлова кислота, наприклад, здатна прискорювати загоювання ран, захищаючи клітини від окислювального стресу, вона також здатна прискорювати загоювання у гіперглікемічних умовах, сприяючи міграції клітин [5, 6]. Хлорогенова кислота є потужним антиоксидантом і також володіє омолоджуючими і фотозахисними властивостями [30].

Дослідження польських вчених продемонстрували високу антибактеріальну активність екстракту бузини в діапазоні концентрацій 0,5-0,05%, а найбільший антибактеріальний вплив відповідно проявили апігенін, кемпферол та ферулова

кислота [3]. Проводили також дослідження ферментованого екстракту *Sambucus nigra*, екстракт показав інгібуючий ефект на ферменти еластази та колагенази, що демонструє його великий потенціал у косметичній галузі, як компонента, що уповільнює старіння [8].

Методика дослідження

У визначенні флавоноїдів виділяють якісний та кількісний аналіз. Якісний аналіз дозволяє визначити загальну наявність флавоноїдів у досліджуваному зразку, а також, встановити їх приналежність до певної групи. До нього відносять класичні реакції у пробірці, такі, як:

1. Реакція з $AlCl_3$ – утворення жовто-зеленого або коричневого забарвлення
2. Ціанідинова реакція (проба Шинода) – залежно від групи флавоноїдів утворюється червоне або рожеве забарвлення.
3. Реакція з лугами ($NaOH$, KOH). Розчин жовтіє.
4. Реакція із свинцю ацетатом – утворюється осад.

До якісного аналізу відносять також тонкошарову хроматографію – R_f -значення, колір і флуоресценція дозволяють визначити присутність різних груп флавоноїдів. Якісний аналіз є малоінформативним, адже дозволяє лише зробити висновок про наявність флавоноїдів, без кількісного вмісту, що можна дізнатись, опрацювавши літературні джерела.

Кількісний аналіз є помітно інформативнішим, адже дозволяє дізнатись кількість флавоноїдів у досліджуваному зразку. До кількісного аналізу відносять:

1. Спектрофотометричний аналіз – флавоноїди утворюють комплекс з $AlCl_3$, який має максимум поглинання 430 нм або 510 нм. Цей метод є достатньо точним, інформативним та недорогим у реалізації.
2. Хроматографічний метод дає змогу отримати точну концентрацію усіх компонентів у сполуці, проте потребує досить дорогого та рідкісного обладнання, складної методології та витратних матеріалів.

При порівнянні ефективності, вартості дослідження, її складності та наявної методології можемо зробити вибір на користь спектрофотометричного методу визначення флавоноїдів.

Постановка завдання. Метою роботи є: визначення вмісту флавоноїдів у екстрактах бузини та горобини для отримання експериментальних даних та висновків про подальше використання сировини у дослідженнях.

Виклад основного матеріалу.

Екстрагування рослинної сировини

Процедура екстракції рослинної сировини:

1. Зібрану сировину сушать шляхом ліофілізації, а саме, осушення холодом. Цей процес являє собою виморожування вологи (дегідратацію) в умовах зниженого тиску та температури. В основі даного процесу лежить явище сублімації – волога випаровується, минаючи рідку фазу. Саме ліофілізат здатен зберегти найбільшу кількість флавоноїдів у своєму складі [31].

2. Отриманий ліофілізат змішують із розчинником етанолом.

3. Наступним етапом є проведення ультразвукової екстракції упродовж 20 хв, частоті 35 кГц та при температурі 20 °C [32].

4. Після цього екстракт фільтрують шляхом центрифугування та пропусканням через порову мембрану.

5. Для отримання концентрату розчинник випарюють в рото-вакуумі або концентраторі при температурі не більшій за 40-50 °C задля попередження руйнування фенольних сполук.

У дослідженнях були використані екстракти квітів бузини 5:1 та ягід горобини 10:1 отримані від Науково-виробничої компанії “Віларус” (Сертифікат якості № 2202, Номер партії: 22020625).

Спектрофотометричне дослідження отриманих зразків

Визначення втрати в масі при висушуванні (вологість). Втрату в масі при висушуванні досліджуваних зразків сухих екстрактів з ягід горобини та квітів бузини визначали за допомогою вологоміра RADWAG MA 50.R.

1,0 г досліджуваного зразка відповідного екстракту поміщали у вологомір та висушували при температурі 105 °C до досягнення постійної маси. Вимірювання здійснювали 3 рази та розраховували середнє значення.

Визначення загального вмісту флавоноїдів. Загальний вміст флавоноїдів визначали за допомогою методу абсорбційної спектрофотометрії з використанням алюмінію хлориду ($AlCl_3$), що ґрунтується на здатності іонів Al^{3+} утворювати комплекси з флавоноїдами. Готували розчини досліджуваних зразків екстрактів з концентрацією 1,0 г/л. 0,25 мл розчину відповідного екстракту змішували з 1,0 мл води та 0,075 мл 5% розчину нітриту натрію ($NaNO_2$), залишали реагувати за кімнатної температури протягом 5 хв. Далі додавали 0,075 мл 10% розчину $AlCl_3$, після 5 хв інкубування в реакційну суміш вносили 0,5 мл 1М розчину натрію гідроксиду ($NaOH$) і 0,6 мл води [34].

Результати визначення кількісного вмісту флавоноїдів у досліджуваних зразках екстрактів

Сухий екстракт квітів бузини			Сухий екстракт ягід горобини		
Вимір	Кількісний вміст флавоноїдів, г/л	Середнє значення	Вимір	Кількісний вміст флавоноїдів, г/л	Середнє значення
1	0,174	0,172±0,003	1	0,071	0,067±0,03
2	0,175		2	0,068	
3	0,169		3	0,064	

Загальний вміст флавоноїдів виражали в рутиновому еквіваленті (РЕ) і визначали спектрофотометричним методом на планшетному аналізаторі Varioskan Flash при довжині хвилі $\lambda=510$ нм за попередньо побудованим калібрувальним графіком залежності абсорбції від концентрації рутину в розчині ($R^2=0,9996$) [33, 34]. Кожен вимір повторювали тричі та розраховували середнє значення.

Результати були виражені як середнє $\pm$ стандартне відхилення, оцінене у трьох незалежних повторях. Статистичні розрахунки виконувалися у програмному забезпеченні Microsoft Excel для Microsoft 365, версія 2019. Дані були проаналізовані на статистичну значущість за допомогою одностороннього дисперсійного аналізу ANOVA з пост-факторним тестом Tukey HSD. Достовірними вважали значення $p \leq 0,05$.

Висновки. Встановлено, що загальний вміст флавоноїдів за рутиновим еквівалентом у досліджуваному зразку сухого екстракту квітів бузини становить 182 ± 3 мг/г сухого екстракту.

Встановлено, що загальний вміст флавоноїдів за рутиновим еквівалентом у досліджуваному зразку сухого екстракту з ягід горобини становить 69 ± 3 мг/г сухого екстракту.

Результати досліджень показали, що більший вміст флавоноїдів був у екстракті квітів бузини ніж у екстракті ягід горобини, а саме у 2,6 разів. Можемо припустити, що більша кількість флавоноїдів у сировині з бузини свідчатиме про її кращий сонцезахисний ефект.

Для порівняння кількості флавоноїдів в інших екстрактах ми навели таку літературу [20, 21, 23, 24] – для горобини та [26, 27, 28] – для бузини.

Список літератури:

1. Green synthesis, characterization and anti-inflammatory activity of silver nanoparticles using European black elderberry fruits extract / L. David та ін. *Colloids and Surface*. 2014. Т. 122. С. 767–777. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.08.018>.
2. Inhibition of Proinflammatory Activities of Major Periodontal Pathogens by Aqueous Extracts From Elder Flower (*Sambucus nigra*) / E. Harokopakis та ін. *Journal of Periodontology*. 2006. Т. 77. С. 271–279. URL: <https://doi.org/10.1902/jop.2006.050232>.
3. *Sambucus Nigra* Extracts–Natural Antioxidants and Antimicrobial Compounds / A. Przybylska-Balcerek та ін. *Molecules*. 2021. Т. 26. С. 2910. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26102910>.
4. A Flavonoid-Rich Extract of *Sambucus nigra* L. Reduced Lipid Peroxidation in a Rat Experimental Model of Gentamicin Nephrotoxicity / R. A. Ungur та ін. *Materials*. 2022. Т. 15. С. 772. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15030772>.
5. Elderberry (*Sambucus nigra* L.) as potential source of antioxidants. Characterization, optimization of extraction parameters and bioactive properties / R. Domínguez та ін. *Food Chemistry*. 2020. Т. 330. С. 127266. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127266>.
6. Gallic Acid Promotes Wound Healing in Normal and Hyperglucidic Conditions / D. Yang та ін. *Molecules*. 2016. Т. 21. С. 899. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules21070899>.
7. Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of the extracts isolated from the pomace of rowanberry (*Sorbus aucuparia* L.) / R. Bobinaitė та ін. *Food Research International*. 2020. Т. 136. С. 109310. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109310>.
8. Anti-Inflammatory and Protective Effects of Water Extract and Bioferment from *Sambucus nigra* Fruit in LPS-Induced Human Skin Fibroblasts / M. Wójciak та ін. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Т. 24. С. 10286. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms241210286>.
9. *Sambucus nigra* L. ameliorates UVB-induced photoaging and inflammatory response in human skin keratinocytes / P. Lin та ін. *Cytotechnology*. 2019. Т. 71. С. 1003–1017. URL: <https://doi.org/10.1007/s10616-019-00342-1>.
10. Preparation of organic acid lignin submicrometer particle as a natural broad-spectrum photo-protection agent / L. Shu-Xian та ін. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Т. 132. С. 836–843.

11. Sadeghifar H., Ragauskas A. Lignin as a UV Light Blocker—A Review. *Polymers*. 2020. T. 12. C. 1134.
12. Silymarin, a molecule of interest for topical photoprotection / C. Couteau та ін. *Natural Product Research*. 2012. T. 26. C. 2211–2214.
13. Dal Belo S. E., Gaspar L. R., Campos P. M. B. G. M. Photoprotective Effects of Topical Formulations Containing a Combination of Ginkgo biloba and Green Tea Extracts. *Phytotherapy research*. 2011. T. 25. C. 1854–1860. URL: <https://doi.org/10.1002/ptr.3507>.
14. In vitro antioxidant and photoprotective activity of five native Brazilian bamboo species / K. Wróblewska та ін. *Industrial Crops and Products*. 2019. T. 130. C. 208–215.
15. Fungal melanin as a biocompatible broad-spectrum sunscreen with high antioxidant activity / J.-J. Oh та ін. *RSC Advances*. 2021. T. 11. C. 19682–19689. URL: <https://doi.org/10.1039/d1ra02583j>.
16. Isoflavone Genistein: Photoprotection and Clinical Implications in Dermatology / H. Wei та ін. *The Journal of Nutrition*. 2003. T. 133. C. 3811–3819. URL: <https://doi.org/10.1093/jn/133.11.3811s>.
17. Valorization of Berry Fruit By-Products: Bioactive Compounds, Extraction, Health Benefits, Encapsulation and Food Applications / S. Pedisić та ін. *Foods*. 2025. T. 14. C. 1354. URL: <https://doi.org/10.3390/foods14081354>.
18. Biochemical composition and antiradical activity of rowanberry (*Sorbus L.*) cultivars and hybrids with different Rosaceae L. cultivars / K. Kampuss та ін. *Latvian Journal of Agronomy/Agronomija Vestis*. 2009. T. 12. C. 59–65.
19. Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of the extracts isolated from the pomace of rowanberry (*Sorbus aucuparia L.*) / R. Bobinaitė та ін. *Food Research International*. 2020. T. 136. C. 109310. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109310>.
20. Gil-Izquierdo A., Mellenthin A. Identification and quantitation of flavonols in rowanberry (*Sorbus aucuparia L.*) juice. *European Food Research and Technology*. 2001. T. 213. C. 12–17.
21. Phytochemical Profiling of Fruit Powders of Twenty *Sorbus L.* Cultivars / K. Zymone та ін. *Molecules*. 2018. T. 23, C. 2593. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules23102593>.
22. The Influence of Temperature, Storage Conditions, pH, and Ionic Strength on the Antioxidant Activity and Color Parameters of Rowan Berry Extracts / E. Cristea та ін. *Molecules*. 2021. T. 26, C. 3786. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26133786>.
23. Phytochemical Characterisation of *Sorbus* Species: Unveiling Flavonoid Profiles Related to Ploidy and Hybrid Origin / E. Korić та ін. *Plants*. 2025. T. 14, C. 119. URL: <https://doi.org/10.3390/plants14010119>.
24. Comparative analysis of the antioxidant capacity and secondary metabolites accumulation in the fruits of rowan (*Sorbus aucuparia L.*) and some closely related species / Y. L. Lykholat та ін. *Ecology and Noospherology*. 2021. T. 32, C. 3–8. URL: <https://doi.org/10.15421/032101>.
25. Bioactive compounds in sweet rowanberry fruits of interspecific Rowan crosses / J. Mlcek та ін. *Open Life Sciences*. 2014. T. 9, C. 1078–1086. URL: <https://doi.org/10.2478/s11535-014-0336-8>.
26. Leja M., Mareczek A., Nanaszko B. Antyoksydacyjne właściwości owoców wybranych gatunków dziko rosnących drzew i krzewów. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Ogrodnictwo*. 2007. T. 41. C. 327–331.
27. Christensen L. P., Kaack K., Fretté X. C. Selection of elderberry (*Sambucus nigra L.*) genotypes best suited for the preparation of elderflower extracts rich in flavonoids and phenolic acids. *European Food Research and Technology*. 2007. T. 227, C. 293–305. URL: <https://doi.org/10.1007/s00217-007-0723-8>.
28. Color and Antioxidant Properties of Cyanidin-Based Anthocyanin Pigments / F. C. Stintzing та ін. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002. T. 50, C. 6172–6181. URL: <https://doi.org/10.1021/jf0204811>.
29. Duymuş H. G., Göger F., Başer K. H. C. In vitro antioxidant properties and anthocyanin compositions of elderberry extracts. *Food Chemistry*. 2014. T. 155. C. 112–119. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.028>.
30. Rodrigues R., Oliveira M. B. P. P., Alves R. C. Chlorogenic Acids and Caffeine from Coffee By-Products: A Review on Skincare Applications. *Cosmetics*. 2023. T. 10, C. 12. URL: <https://doi.org/10.3390/cosmetics10010012>.
31. Tabaszewska M., Sikora E. The Effect of the Plant Stabilisation Method on the Composition and Antioxidant Properties of Elderflower (*Sambucus nigra L.*) Extract. *Molecules*. 2023. T. 28, C. 2365. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules28052365>.
32. Comparison of the Formulation, Stability and Biological Effects of Hydrophilic Extracts from Black Elder Flowers (*Sambucus nigra L.*) / A. Lauritis та ін. *Pharmaceutics*. 2022. T. 14, C. 2831. URL: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14122831>.
33. *Cichorium intybus L.* «hairy» roots as a rich source of antioxidants and anti-inflammatory compounds / N. Matvieieva та ін. *Heliyon*. 2023. T. 9. C. 14516. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.14516>.
34. Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів». (2015). *Державна Фармакопея України Друге видання*. Т. 1.

Перелік умовних скорочень:

UVB – (з англ. ultraviolet B) коротка ультрафіолетова хвиля.

ROS – (з англ. Reactive oxygen species) активні форми кисню.

БАР – біологічно активні речовини.

Sterenchuk S.M. DETERMINATION OF FLAVONOID CONTENT IN PLANT EXTRACTS BY SPECTROPHOTOMETRIC METHOD

There is a high demand for research and application of plant raw materials in science. This is due to its wide distribution and low cost. Research on the content of flavonoids allows us to distinguish the most effective bioavailable raw materials from others, since a number of useful properties of these compounds are known: antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory, sedative and sun-protective effects.

There are 2 ways to identify flavonoids – quantitative and qualitative analysis. Qualitative analysis confirms the presence of flavonoids in the plant, and is quite uninformative, while quantitative analysis allows us to determine not only the presence but also the list and content of flavonoids in the raw material. Among the quantitative analysis, spectrophotometric analysis and chromatographic analysis are distinguished. The latter is expensive and difficult to perform, requires rare equipment and the creation of a methodology.

The aim of the work was to determine the amount of flavonoids in plant extracts of mountain ash and elderberry by the spectrophotometric method. Extracts of elderberry flowers 5:1 and rowan berries 10:1 obtained from the Scientific and Production Company “Vilarus” were studied. The extracts were obtained by lyophilization and mixing with a solvent ethanol. After that, ultrasonic extraction was performed and filtered by centrifugation and passage through a porous membrane. To obtain a dry concentrate, the solution was evaporated. Before determining the content of flavonoids, the concentrate was placed in a moisture meter to achieve constant mass. The study was carried out by absorption spectrophotometry using aluminum chloride (AlCl₃). The total content of flavonoids was expressed in rutin equivalent and determined using calibration graphs of the dependence of absorption on the concentration of rutin in the solution.

The obtained research results indicate a high content of flavonoids in both samples, but a higher amount in the elderberry flower extract – 182±3 mg/g of dry extract. We can conclude that this plant raw material has high practical importance for many branches of chemistry and is promising for further research, and also requires the preservation of natural resources of its raw material.

Key words: *spectrophotometric method, plant extracts, mountain ash, elderberry, flavonoids.*

Дата надходження статті: 17.10.2025

Дата прийняття статті: 05.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 621.926:621.867.5((66.095.5))
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/32>

Табачун М.О.

Сумський державний університет

Скиданенко М.С.

Сумський державний університет

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ ВІБРАЦІЙНИХ ПРИЛЕРІВ

У дослідженні здійснено комплексний аналіз сучасного стану, тенденцій розвитку та технологічних особливостей конструкцій вібраційних прилерів, що застосовуються у виробництві гранульованих мінеральних добрив, зокрема аміачної селітри, пористої аміачної селітри та карбаміду. Розглянуто систематизований огляд принципів роботи статичних, акустичних, вібраційних та обертових грануляційних систем із виокремленням конструктивних параметрів, які найбільше впливають на стабільність формування струменя розплаву, рівномірність відриву крапель та однорідність отримуваних гранул. Особливу увагу приділено фізичним механізмам відриву краплі, включно з взаємодією інерційних, в'язкісних та капілярних сил, умовами формування та руйнування стабільної ділянки струменя, а також впливом контрольованих механічних коливань на характер розвитку капілярної нестійкості.

Детально проаналізовано динамічні режими роботи вібраційних прилерів: роль частоти та амплітуди збудження, механічну реакцію перфорованих елементів, зміни радіуса перетяжки струменя перед відривом, періодичність формування крапель та вплив цих чинників на гранулометричний склад продукту. Показано, що оптимізація геометрії перфорованих пластин, удосконалення характеристик коливальних вузлів та застосування керованого збудження забезпечують суттєве підвищення однорідності гранул за умов змінної подачі розплаву. Окремо відзначено зростаючу роль цифрових моделей, систем високоточного моніторингу та адаптивних алгоритмів керування, які дають змогу передбачати поведінку струменя, своєчасно коригувати параметри процесу та стабілізувати грануляцію в промислових масштабах.

Отримані результати свідчать про поступовий перехід від традиційних механічних рішень до інтегрованих інтелектуальних систем, у яких конструктивні, динамічні та керувальні аспекти розглядаються комплексно. Це забезпечує підвищення надійності, повторюваності та якості процесу прилоутворення, що має важливе значення для сучасного виробництва мінеральних добрив.

Ключові слова: вібраційні прилери, грануляція, інтенсивність коливань, ефективність процесу, динамічне керування.

Постановка проблеми. У сучасному виробництві мінеральних добрив, де річні обсяги випуску досягають сотень тисяч і мільйонів тонн, ключовим етапом технологічного циклу залишається формування гранул у грануляційних баштах. Оскільки більшість підприємств прагне збільшувати продуктивність без спорудження нових баштових комплексів, пріоритетним напрямом модернізації стає удосконалення диспергувальних вузлів, серед яких провідне місце займають статичні та обертові вібраційні гранулятори. Їхня ефективність зумовлена можливістю ініціювати керовані гідродинамічні збурення та забезпечувати регулярний розпад струменя розплаву з фор-

муванням гранул стабільного гранулометричного складу навіть за зміни технологічних параметрів.

Водночас забезпечення стабільної роботи вібраційних прилерів у промислових умовах залишається складною інженерною задачею. Струмінь розплаву, що виходить із отвору перфорованої оболонки, характеризується динамічною нестійкістю: на нього одночасно впливають капілярні сили, інерційні ефекти, флуктуації внутрішнього тиску, вісесиметричні збурення та чинники навколишнього газового середовища. Природна довжина розпаду струменя визначається фізичними властивостями розплаву й геометрією отвору, і навіть незначні зміни витрати чи темпера-

тури здатні суттєво впливати на режим утворення перетяжок [1]. Накладення вібраційного впливу – основний принцип роботи вібраційних грануляторів – модифікує характер нестабільностей струменя. Залежно від частоти, амплітуди та форми збуджувального сигналу процес розпаду може переходити як у впорядкований режим відриву крапель, так і в нерегулярне дроблення. В обертових вібраційних грануляторах до цього додається вплив відцентрового тиску, складної внутрішньої гідродинаміки розплаву та коливальних процесів, що передаються через диск-випромінювач і перфороване днище. Нелінійні властивості коливальних систем, зміна маси розплаву в кошику, температурні градієнти та відмінність реальних сигналів від гармонічних моделей ускладнюють керування динамікою відриву крапель. Додатковим фактором є теплові процеси: після виходу з отвору крапля зазнає інтенсивного охолодження, і, як показано у дослідженні [2], початкові умови теплообміну впливають на геометрію, щільність і подальше формування гранули. У промислових умовах саме неузгодженість між гідродинамікою струменя, режимами збудження та тепловими процесами призводить до збільшення частки гранул нестабільної форми, дефектних утворень або дрібнодисперсної фракції.

У підсумку формулюється науково-технічна проблема розроблення конструкцій вібраційних прилерів, здатних забезпечувати стабільний і керований розпад струменя розплаву в широкому діапазоні навантажень, температур і швидкостей обертання. Її вирішення передбачає поглиблене вивчення внутрішньої гідродинаміки перфорованих оболонок, взаємодії вимушених коливань із течією розплаву, впливу параметрів диска-випромінювача на тиск у зоні отворів, а також створення методів прогнозування гранулометричного складу на основі точного керування параметрами збудження. Поєднання вдосконалених фізичних моделей, сучасних конструктивних підходів і адаптивних систем керування визначає актуальність подальших досліджень у галузі вібраційних грануляторів для виробництва мінеральних добрив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях проблематика стабільності та керованості процесів у вібраційних грануляторах розглядається як ключовий чинник формування однорідного гранулометричного складу у виробництві мінеральних добрив. Механічні коливання, які накладаються на струмінь розплаву в статичних та обертових вібраційних грануляторах, визначають механізм утворення перетяжок,

швидкість відриву крапель та розвиток капілярної нестійкості. Це потребує високоточного контролю параметрів збудження та коректних моделей взаємодії коливань із гідродинамікою струменя.

У науковій роботі [3] показано, що зміна частоти та амплітуди накладених коливань здатна істотно змінювати характер поверхневих хвиль і процес формування краплі. Автори продемонстрували, що навіть незначні коливальні відхилення можуть порушувати регулярність руйнування струменя, що є критично важливим для промислових прилерів. Фундаментальні закономірності природного розпаду рідинного струменя викладені у раніше згаданій праці [1]. Доведено залежність довжини стабільної ділянки струменя від поєднання капілярних, інерційних та реологічних властивостей. Запропонований авторами підхід дозволяє моделювати вплив зовнішніх збурень, що на пряму корелює з роботою вібраційних грануляторів, де на рідину діють регулярні вимушені коливання. Прикладний аспект взаємодії струменя з коливальними елементами конструкції розкрито у дослідженні А. Потніса та А. Сахи [4]. Вони встановили, що коливання навіть малої амплітуди впливають на геометрію струменя та момент відриву краплі, що підтверджує доцільність удосконалення перфорованих оболонок та вузлів передачі коливань у прилерах.

Окремим напрямом є врахування температурних ефектів. У дослідженні [2] доведено, що температурні градієнти на ранніх стадіях охолодження крапель визначають подальшу морфологію гранул та їхню стійкість до механічних деформацій. У баштових виробництвах мінеральних добрив це безпосередньо впливає на якість готової продукції. Сфера діагностики та високоточного моніторингу також активно розвивається. Наукова робота К. Рембе та ін. [5] демонструє можливість застосування лазерно-доплерівської віброметрії для контролю коливань конструктивних елементів у реальному часі. Такий підхід відкриває перспективи впровадження безконтактних систем контролю стану вібраційних грануляторів. У науковій статті Х. Вана та ін. [6] підкреслено, що для складних механічних систем важливим є врахування локальних резонансних зон, власних частот та форм коливань при моделюванні динаміки обладнання. Це безпосередньо стосується перфорованих оболонок прилерів, які працюють як системи зі змінним навантаженням і потребують точного врахування коливальних характеристик.

Дослідження поведінки гранульованих середовищ під дією коливань, представлені П. Вотсоном

та ін. [7], показують, що насипний гранульований матеріал реагує на зовнішні коливання чутливо та може змінювати структуру руху залежно від амплітудно-частотних характеристик. Це означає, що параметри збудження мають регулюватися з високою точністю, щоб уникнути нерівномірного гранулоутворення. Важливий внесок зроблено також у сфері досліджень поведінки рідини на поверхнях зі змінними поверхневими властивостями. У роботі А. С. Раві та С. Далві [8] описано механізми деформації межі поділу фаз під дією коливань, що є суттєвим для моделювання початкових стадій формування крапель. Ц. Ян та ін. [9] показали, що флуктуації тиску у зоні перед вихідним отвором можуть значно впливати на симетрію й стабільність струменя – параметр, що потребує врахування при оптимізації геометрії перфорованих оболонок.

Узагальнюючи, сучасні дослідження підтверджують багатофакторний характер процесів, що визначають роботу вібраційних грануляторів. Синтез гідродинамічних, коливальних та теплових моделей є необхідною умовою для подальшого вдосконалення конструкцій диспергуючих пристроїв у виробництві мінеральних добрив.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у визначенні сучасного стану та окресленні перспектив розвитку конструкцій прилерів, що працюють із контрольованим механічним збудженням і застосовуються у виробництві мінеральних добрив. Для досягнення поставленої мети проаналізовано конструктивні рішення статичних, акустичних, систем із механічним збудженням та обертових грануляторів, встановлено їхній вплив на стабільність капілярного струменя, момент відриву краплі та однорідність гранул. Окрему увагу приділено фізичним механізмам формування гранул у режимах, де на перфоровані елементи та потік діє періодичне збудження, зокрема ролі частоти й амплітуди та їх чутливості до змін властивостей розплаву. На цій основі оцінено динамічні режими роботи таких конструкцій і визначено параметри, що забезпечують стабільний гранулометричний склад у промислових умовах.

Виклад основного матеріалу. Формування гранул у вібраційних прилерах ґрунтується на закономірностях капілярної нестійкості, описаних класичною моделлю Релея, згідно з якою тонкий рідинний струмінь є нестійким відносно малих осьових збурень. За відсутності зовнішнього впливу струмінь зберігає стабільність на певній довжині, після чого на ньому формується перетяжка, що визначає момент відриву краплі.

Для однорідного потоку критичну довжину стабільної ділянки L_0 можна подати у вигляді співвідношення:

$$L_0 \approx 3,14d \left(1 + \frac{3We}{4} \right), \quad (1)$$

де d – діаметр отвору, а We – число Вебера, яке характеризує співвідношення інерційних і капілярних сил. Це рівняння дає змогу визначити межі природного розпаду струменя та оцінити момент формування первинної краплі у системах без механічних збурень, що узгоджується з результатами дослідження [1].

У разі накладання вібраційного впливу стабільність струменя змінюється, оскільки періодичні коливання створюють циклічні зміни тиску та швидкості витікання в зоні отворів. Амплітуда збудження A впливає на розвиток перетяжки та скорочує довжину стабільної ділянки, що можна описати узагальненим наближенням:

$$L = L_0 \left(1 - k \frac{A}{d} \right), \quad (2)$$

де k – коефіцієнт чутливості струменя до заданих збурень. За збільшення амплітуди відрив краплі відбувається раніше, а діаметр сформованих гранул зменшується завдяки інтенсивнішому розвитку капілярної нестійкості. Частота збудження визначає фазово-синхронізовану взаємодію між коливанням конструкції та моментом утворення перетяжки. За підвищених частот формується періодичний режим, у якому відрив краплі відбувається у фіксовані часові інтервали, що забезпечує стабільний діаметр гранул. У таких умовах механічний вплив стає домінуючим фактором, який задає темп краплеутворення незалежно від природної нестабільності струменя, що підтверджують експериментальні дослідження С. Мака та ін. [3].

На перебіг процесу істотно впливають властивості розплаву. Збільшення поверхневого натягу підвищує стабільність струменя й збільшує L_0 ; підвищена в'язкість сповільнює розвиток хвильових збурень; зміна температури визначає як в'язкісні, так і капілярні характеристики, від яких залежить рівномірність гранул. Як показано науковцями [2], початкові температурні умови формують різну швидкість охолодження первинних крапель і впливають на їхню геометрію та механічні властивості. Узгодження частоти, амплітуди та властивостей розплаву забезпечує керований режим грануляції, у якому формування перетяжки й момент відриву визначаються не випадковими збуреннями, а параметрами збудження. Саме поєднання дії капілярних сил, інерційних ефек-

тів і механічних коливань забезпечує можливість отримувати стабільний гранулометричний склад у вібраційних прилерах у широкому діапазоні технологічних режимів.

У промисловому виробництві мінеральних добрив гранулятори виконують ключову функцію формування стабільних струменів розплаву та перетворення їх у краплі з прогнозованими властивостями. Якість гранул визначається не тільки фізичними параметрами розплаву, а й геометрією перфорованої поверхні, режимом підведення розплаву, способом збудження струменя та умовами відриву краплі. Саме тому порівняння конструкцій грануляторів, що застосовуються в галузі, дозволяє оцінити характер їх впливу на стабільність струменя та гранулометрію продукту. Найпоширенішими рішеннями є лійковий статичний гранулятор, акустичний статичний гранулятор, вібраційний статичний гранулятор та група обертових грануляторів, кожен із яких формує власний режим краплеутворення.

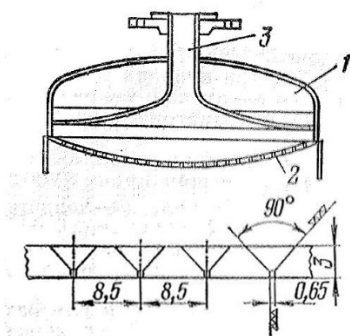


Рис. 1. Статичний гранулятор лійкового типу
1 – повітряна ізоляція; 2 – отвори витікання розплаву; 3 – патрубок вводу розплаву

Рисунок 1 демонструє конструкцію статичного гранулятора лійкового типу, у якому формування крапель відбувається внаслідок природної капілярної нестійкості струменя. Перфороване днище визначає геометрію витікання, а повітряна ізоляція навколо робочої зони допомагає зберігати стабільну температуру розплаву та запобігає різким тепловим градієнтам. Розподіл отворів на днищі забезпечує рівномірне утворення множини струменів, що є критичним для підтримання повторюваної гранулометрії при високих витратах. Патрубок подачі розплаву розміщений таким чином, щоб забезпечити симетричний розподіл матеріалу над перфорованою поверхнею, що зменшує ризик локальних коливань рівня та відхилення довжини стабільної ділянки струменя. Завдяки простій конструкції та мінімальній кількості рухомих елементів

цей тип гранулятора зберігає відтворюваність процесу за умови сталої температури й витрати, що робить його базовим рішенням у виробництві мінеральних добрив.

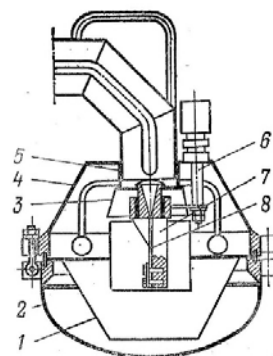


Рис. 2. Акустичний статичний гранулятор
1 – сітчастий фільтр; 2 – сферичне перфороване дно; 3 – щільове сопло; 4 – корпус; 5 – пристрій для регулювання витрати розплаву; 6 – механізм для переміщення резонансної пластини; 7 – рухомий кронштейн; 8 – резонансна пластина

Рисунок 2 ілюструє конструкцію акустичного статичного гранулятора, у якому процес формування крапель керується не лише гідростатичними параметрами, а й накладеним хвильовим збудженням. Сферичне перфороване дно визначає напрям витікання струменів та сприяє їх симетричному виходу, що важливо для підтримання стабільної довжини капілярної ділянки. Щільове сопло вирівнює подачу розплаву по всій робочій площині та зменшує ризик локальних коливань витрати. Сітчастий фільтр перед перфорованою частиною перешкоджає потраплянню включень, які можуть викликати нерівномірність струменя або порушення періодичності відриву. Резонансна пластина разом із механізмом її переміщення створює контрольовані високочастотні коливання, що впливають на момент утворення перетяжки. Така форма збудження дозволяє узгоджувати зовнішню хвильову дію із природними капілярними нестійкостями струменя, забезпечуючи повторюваність формування крапель у режимах змінної температури та витрати. Рухомий кронштейн і регулятор подачі розплаву дають змогу точно налаштовувати робочий режим, що є важливим для підтримання стабільної гранулометрії у виробництві мінеральних добрив.

Рисунок 3 демонструє конструкцію вібраційного статичного гранулятора, у якому механічне збудження безпосередньо передається на перфороване дно через центральний стрижень. Така схема забезпечує синхронізацію коливань із моментом утворення перетяжки, завдяки чому

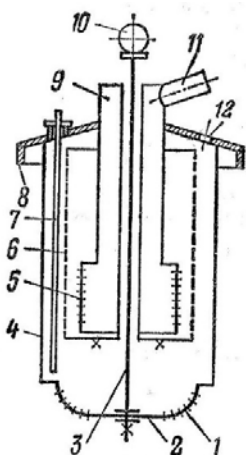


Рис. 3. Вібраційний статичний гранулятор

- 1 – перфороване дно; 2 – центральна неперфорована частина дна; 3 – стрижень; 4 – корпус гранулятора; 5 – розподільвач; 6 – сітка для фільтрації розплаву; 7 – п'єзометричний датчик рівня; 8 – ущільнювальне кільце; 9 – кільцевий канал; 10 – вібратор; 11 – ввід розплаву; 12 – вихід повітря

відрив краплі відбувається у стабільних умовах навіть за зміни витрати або температури розплаву. Перфорована частина дна формує множину рівномірних струменів, а центральна неперфорована зона стабілізує розподіл тиску й запобігає локальному перерозподілу потоку під дією коливань. Живлення здійснюється через розподільвач, що вирівнює надходження розплаву по всій площині

дна, а фільтрувальна сітка утримує механічні домішки, які могли б порушити симетрію струменів. П'єзометричний датчик рівня дозволяє контролювати висоту шару розплаву, підтримуючи умови стабільного витікання. Кільцевий канал та ущільнювальне кільце забезпечують надійність конструкції й перешкоджають проникненню повітря у зону диспергування. Роботу гранулятора приводить у дію вібратор, параметри якого визначають характер зовнішнього збудження та впливають на повторюваність відриву крапель. Повітря відводиться через окремий канал, що сприяє збереженню стабільного тиску всередині корпусу. Сукупність цих елементів дозволяє формувати гранули із передбачуваною геометрією у широкому діапазоні технологічних режимів, характерних для виробництва мінеральних добрив.

Рисунок 4 подає три конструктивні варіанти обертових грануляторів, що застосовуються у виробництві мінеральних добрив для диспергування розплаву через перфоровану оболонку під дією відцентрових сил. В основі їхньої роботи лежить формування тонкого шару розплаву на внутрішній поверхні оболонки та подальший винос крапель за межі апарата при обертанні. У варіанті з циліндрично-конічною оболонкою (а) розподілення розплаву здійснюється радіальними лопатками, які рівномірно подають його на стінку, забезпечуючи стабільний шар і передбачуваний характер відриву крапель. П'єзометрична трубка

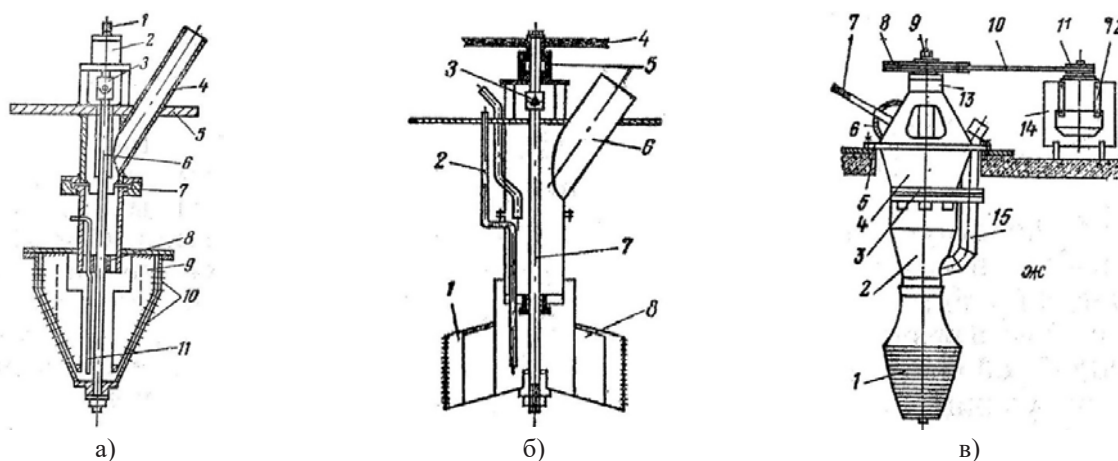


Рис. 4. Обертові гранулятори

- а) лопатковий з циліндрично-конічною оболонкою: 1 – вал приводу; 2 – підшипники; 3 – шарнірна муфта; 4 – патрубок для підведення розплаву; 5 – фланець; 6 – нижній вал; 7 – шарове з'єднання; 8 – втулка; 9 – радіальні лопатки; 10 – перфорована оболонка; 11 – п'єзометрична трубка для контролю навантаження;
б) лопатковий з циліндричною оболонкою: 1 – перфорована оболонка; 2 – п'єзометричний датчик рівня розплаву; 3 – шарнірна муфта; 4 – шків; 5 – вузол підшипників; 6 – ввід розплаву; 7 – вал; 8 – лопаті;
в) марки ГрЦСа-40 з дво- та чотирьохсекційними перфорованими конічними оболонками і пристроєм для розподілення розплаву: 1 – перфорована оболонка; 2 – живильна камера; 3, 13 – підшипникові вузли; 4 – корпус; 5 – опорна плита; 6 – шкала; 7 – важіль для керування пристроєм розподілення розплаву; 8, 11 – шкиви; 9 – вал; 10 – пасова передача; 12 – електродвигун; 14 – плита для монтажу двигуна; 15 – патрубок для вводу розплаву

дає змогу контролювати навантаження та робочий рівень розплаву, що особливо важливо при змінній витраті. Конічна геометрія сприяє впорядкованому руху шару та зменшує вплив місцевих коливань на диспергування. Конструкція з циліндричною оболонкою (б) працює за аналогічним принципом, але має спрощену схему, де лопаті розподіляють розплав по внутрішній поверхні корпусу. Датчик рівня стабілізує товщину шару, що підтримує сталий режим формування крапель. У варіанті марки ГрЦСа-40 (в) використано дво- або чотирисекційні конічні оболонки зі спеціальним механізмом розподілу розплаву, який дозволяє балансувати подачу між секціями та забезпечувати рівномірність роботи при високих продуктивностях. Вибір типу обертового гранулятора визначається властивостями розплаву, необхідним діапазоном продуктивності та вимогами до гранулометричного складу. За рахунок регульованої швидкості обертання такі апарати здатні підтримувати стабільний режим краплеутворення, хоча чутливість до зміни товщини шару й до локальних неоднорідностей поверхні оболонки потребує точного налаштування робочих параметрів. Кожний тип гранулятора формує власний механізм контролю струменя: статичні конструкції працюють у рамках природної капілярної нестійкості, акустичні додають хвильове збудження, вібраційні дають змогу точно керувати моментом відриву, а обертові реалізують режим, у якому домінує відцентрова дія. Вибір конструкції визначається вимогами до продуктивності, стабільності струменя, чутливості до коливань температури та необхідного гранулометричного складу для конкретних умов виробництва мінеральних добрив.

Динамічна поведінка струменя у вібраційних прилерах визначає стабільність формування гранул і суттєво впливає на розподіл за діаметром. У базовому режимі довжина стабільної ділянки струменя L_0 описується класичним співвідношенням, що враховує діаметр отвору d , густину ρ , швидкість витікання v та поверхневий натяг σ :

$$L_0 \approx \pi d \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\rho v^2 d}{\sigma} \right), \quad (3)$$

що відображає вплив інерційних та капілярних сил на первинний момент формування перетяжки. У присутності коливань ця характеристика модифікується, оскільки амплітуда збудження змінює профіль струменя. Для узагальненої оцінки такої зміни використовують вираз:

$$L = L_0 \left(1 - k \frac{A}{d} \right), \quad (4)$$

де A – амплітуда збудження, а k – коефіцієнт чутливості струменя до прикладених деформацій. Зростання амплітуди призводить до більш раннього формування перетяжки, що зменшує розмір крапель та стабілізує гранулометричний склад. Частотна характеристика коливань відіграє не меншу роль. Зі збільшенням частоти ω інтервал між двома циклічними деформаціями шийки струменя скорочується, і момент відриву настає раніше. Для реального струменя це означає зменшення середнього діаметра краплі та підвищення рівномірності, оскільки фазова синхронізація коливального впливу з перебігом капілярної нестійкості зменшує вплив випадкових флуктуацій [2].

Важливою динамічною характеристикою є пульсації подачі розплаву. Навіть незначні зміни тиску всередині живильної камери призводять до періодичної зміни витратного режиму, що відбивається на діаметрі та швидкості витікання струменя. У вібраційних конструкціях ця пульсація частково компенсується коливаннями, однак ступінь компенсації залежить від товщини та жорсткості перфорованої оболонки. Тонкостінні оболонки можуть деформуватися синхронно з коливальним сигналом, що впливає на локальну форму вихідних каналів і змінює діаметр струменя ще до появи перетяжки. Загальна динаміка роботи конструкції визначається також властивостями перфорованої оболонки – її висотою, жорсткістю та геометрією. Розподіл коливань уздовж стінок впливає на те, наскільки рівномірно працюють окремі отвори. У жорсткіших конструкціях коливання передаються рівномірно, забезпечуючи синхронне формування сукупності струменів. У більш гнучких оболонках можливе локальне зміщення фаз коливань, що спричиняє різницю в довжині стабільних ділянок і, відповідно, варіабельність діаметра гранул [10].

Взаємодія сусідніх струменів у промислових умовах є суттєвим фактором. При збільшенні навантаження міжструминна відстань зменшується, і траєкторії руху частинок можуть зближуватися в початковій зоні. Правильний добір амплітуди та частоти збудження дозволяє зменшити довжину початкової ділянки, стабілізувати напрямок руху гранул і знизити ймовірність перехрещення факелів. В обертових грануляторах динаміка відриву визначається іншим механізмом – відцентровою дією. Стінка перфорованої оболонки перебуває у стані постійної деформації, залежної від товщини шару розплаву та швидкості обертання. Оскільки відрив краплі тут визначається балансом поверхневого натягу та відцен-

трової сили, невеликі зміни швидкості обертання або нерівномірність шару розплаву можуть збільшувати діапазон гранулометрії. На відміну від цього, у вібраційних конструкціях момент відриву задається коливальним впливом, що сприяє формуванню вужчого розподілу діаметрів.

Висновки. Проведене дослідження дало змогу узагальнити сучасні уявлення про роботу конструкцій прилерів, що застосовуються у виробництві мінеральних добрив. Порівняльний аналіз статичних, акустичних, вібраційних та обертових апаратів показав, що найбільш керований режим формування гранул забезпечують системи, у яких момент відриву краплі визначається поєднанням гідростатичного тиску та зовнішнього механічного збудження. Це дозволяє підтримувати стабільні умови розвитку капілярної нестійкості й одержувати більш рівномірний гранулометричний склад без зміни продуктивності та без втручання в режим подачі розплаву. Аналіз фізичних механізмів струменеутворення засвідчив, що частота та амплітуда коливань прямо впливають на довжину стабільної ділянки струменя та радіус перетяжки перед відривом. Зміна цих параметрів дає можливість

регулювати розмір гранули й зменшувати вплив випадкових збурень у зоні витікання. У конструкціях обертового типу формування гранул додатково визначається дією відцентрових сил, тому якість продукту сильніше залежить від рівномірності подачі на перфоровану оболонку та стабільності обертання. Отримані закономірності підтверджують, що контрольоване механічне збудження є одним із найбільш ефективних шляхів покращення якості грануляції у промислових умовах.

Перспективи подальшого розвитку конструкцій полягають у вдосконаленні геометрії перфорованих елементів, оптимізації масо-габаритних характеристик, підвищенні жорсткості вузлів передавання коливань та поліпшенні рівномірності розподілу розплаву в зоні витікання. Застосування таких рішень дозволить підвищити однорідність гранул, стабільність роботи апаратів та забезпечити відтворюваність процесу при змінних властивостях розплаву. У сукупності ці напрями формують основу подальшого вдосконалення конструкцій прилерів та підвищення ефективності грануляційних процесів у виробництві мінеральних добрив.

Список літератури:

1. Gañán-Calvo A. M., Chapman H. N., Heymann M., Wiedorn M. O., Knoska J., Gañán-Riesco B., López-Herrera J. M., Cruz-Mazo F., Herrada M. A., Montanero J. M., Bajt S. The Natural Breakup Length of a Steady Capillary Jet: Application to Serial Femtosecond Crystallography. *Crystals*. 2021. Vol. 11. No. 8. P. 990. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst11080990>
2. Nadhem A. K. M., Yershova N., Dziuba O. Study of temperature changes in mineral fertiliser granules in the rotating vibrating granulator. *Suchasni Tekhnologii u Promyslovomu Vyrobnystvi*. 2023. URL: <https://journals.uran.ua/tarp/article/view/286693>
3. Mak S. Y., Chao Y., Rahman S., Shum H. C. Droplet formation by rupture of vibration-induced interfacial fingers. *Langmuir*. 2018. Vol. 34. No. 3. P. 926–932. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29094601/>
4. Potnis A., Saha A. On formation and breakup of jets during droplet impact on oscillating substrates. *Experiments in Fluids*. 2025. Vol. 66. Art. 2. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-024-03911-z?utm_source
5. Rembe C., Halkon B. J., Ismail M. A. A. Measuring vibrations in large structures with laser-Doppler vibrometry and unmanned aerial systems: a review and outlook. *Advanced Devices & Instrumentation*. 2025. Vol. 6. P. 0103. URL: <https://spj.science.org/doi/full/10.34133/adi.0103>
6. Wang H., Xiong D., Duan Y., Liu J., Zhao X. Advances in vibration analysis and modeling of large rotating mechanical equipment in mining arena: a review. *AIP Advances*. 2023. Vol. 13. No. 11. P. 110702. URL: <https://pubs.aip.org/aip/adv/article/13/11/110702/2922440>
7. Watson P., Bonnieu S. V., Lappa M. Fluidization and transport of vibrated granular matter: a review of landmark and recent contributions. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2023. Vol. 20. No. 1. P. 1–29. DOI: 10.32604/fdmp.2023.029280
8. Ravi A. S., Dalvi S. Liquid marbles and drops on superhydrophobic surfaces: interfacial aspects and dynamics of formation: a review. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9. Issue 11. DOI: 10.1021/acsomega.3c07657
9. Yan Q., et al. Study on the formation and separation process of droplets in atomization device induced by intra-hole fluctuation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 35. Art. 7. URL: https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-022-00754-9?utm_source
10. Vadaga A. K., Gudla S. S., Nareboina G. S. K., Gubbala H., Golla B. Comprehensive review on modern techniques of granulation in pharmaceutical solid dosage forms. *Intelligent Pharmacy*. 2024. Vol. 2. No. 5. P. 609–629. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949866X24000674>

Tabachun M.O., Skydanenko M.S. CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF VIBRATION DEVICE CONSTRUCTIONS

The study presents a comprehensive analysis of the current state, development trends, and technological features of vibrating priller designs used in the production of granular mineral fertilizers, including ammonium nitrate, porous ammonium nitrate, and urea. It provides a systematic overview of the operating principles of static, acoustic, vibrating, and rotary granulation systems, identifying the structural parameters that most significantly influence melt-jet stability, droplet detachment uniformity, and the homogeneity of the resulting granules. Particular attention is devoted to the physical mechanisms governing droplet formation and breakup, including the interaction of inertial, viscous, and capillary forces, the conditions that determine the formation and collapse of the stable jet region, and the influence of controlled mechanical excitation on the evolution of capillary instability.

The dynamic operating modes of vibrating prillers are examined in detail, with emphasis on the role of excitation frequency and amplitude, the mechanical response of perforated elements, variations in jet necking radius prior to detachment, the periodicity of droplet formation, and the resulting particle-size distribution. It is demonstrated that optimizing the geometry of perforated plates, improving the characteristics of oscillatory assemblies, and applying controlled excitation significantly enhance granule uniformity under variable melt-flow conditions. The analysis further highlights the growing importance of digital modeling, advanced monitoring systems, and adaptive control algorithms capable of predicting jet behavior, adjusting operating parameters in real time, and stabilizing the granulation process at industrial scales.

The findings indicate a gradual shift from traditional purely mechanical improvements toward more integrated and adaptive design concepts, in which structural, dynamic, and control aspects are considered holistically. Such an approach increases the reliability, repeatability, and quality of the prilling process, forming a robust foundation for further advancement of priller designs used in modern fertilizer production.

Key words: vibrating priller, granulation, oscillation intensity, process efficiency, dynamic control.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 16.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 661.094.56
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/33>

Шкода В.О.

Дніпровський державний технічний університет

Кравченко О.В.

Дніпровський державний технічний університет

Гуляєв В.М.

Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А.Л.

Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РЕКУПЕРАЦІЇ ПЛАТИНИ З ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАТАЛІЗАТОРІВ ВИРОБНИЦТВА НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

Для технології виробництва нітратної кислоти при каталітичному окисленні амоніаку киснем повітря в основному застосовують платиноїдні каталізатори. У процесі їх використання відбувається зниження ефективності дії, що пов'язано з відкладенням на каталізаторі осадів. Для відновлення ефективності застосовують різні способи регенерації відпрацьованих каталізаторів. У даній роботі досліджено умови вилучення платини з відпрацьованих каталізаторів шляхом вилугування нітратною кислотою. Встановлено, що для досягнення вилучення платини на рівні 98% і більше достатньо підтримувати окисно-відновний потенціал (ОВП) у пульпі на рівні 780–840 мВ відносно хлорсрібного електрода порівняння, що уникає непродуктивних витрат реагентів та зниження вилучення ренію. Експерименти проведено з платиновим каталізатором R-56 (0,3% Pt), включаючи обпалення при 700 °C та 1250 °C, двостадійне вилугування в 3 М нітратній кислоті при 90–95 °C з подальшою фільтрацією та аналізом. Додатково розглянуто каталізатори на основі дорогоцінних металів, нанесених тонким шаром (наприклад, для очищення вихлопних газів автомобілів з вмістом 0,1–0,4% металів), де хімічні методи вилучення є витратними. Розроблено механічний процес: подрібнення в кульовій або молотковій млині до розмірів частинок <35 мкм або через сито 16 мкм з мокрою сепарацією. У прикладах досягнуто вилучення 88,5–90% Pt та 89,1–89,3% Rh у концентраті, що становить 27% від маси вихідного матеріалу. Робота пропонує ефективні методи переробки відпрацьованих каталізаторів для оптимізації ресурсів та зменшення екологічного впливу. Результати дослідження відносяться до способів вилучення металів платинової групи і ренію з дезактивованих (відпрацьованих) каталізаторів, і можуть бути використані при переробці вторинної сировини. Отримані результати дозволяють оптимізувати витрати ресурсів, підвищити ефективність вилучення платинових металів і можуть бути використані у промисловості при переробці відпрацьованих каталізаторів для зменшення екологічного навантаження та економії сировини.

Ключові слова: платина, каталізатор, вилугування, подрібнення, селективність, регенерація.

Постановка проблеми. Метали платинової групи (PGM, Platinum Group Metals), такі як платина (Pt), паладій (Pd) та родій (Rh), є критичними сировинними матеріалами, які широко використовуються в каталізаторах для очищення вихлопних газів, а також у технологіях декарбонізації, таких як паливні елементи, електролізери та процеси утилізації CO₂. Зростаючий попит на PGM зумовлений жорсткими екологічними стандартами

(наприклад, Euro 6, RDE, WLTP) та глобальними цілями вуглецевої нейтральності до 2050 року. Міжнародний ринок автомобільних каталізаторів оцінювався в 12,45 млрд дол. США у 2022 році та прогнозується на зростання до 18,98 млрд дол. до 2030 року. Видобуток PGM з руд є енергоємним і екологічно шкідливим процесом, що призводить до значних викидів парникових газів, забруднення води та ґрунту: вміст PGM у рудах становить лише

2–10 г/т, тоді як у відпрацьованих автомобільних каталізаторах (SACs) – 2000–15000 г/т [1, с. 6843].

Проблема загострюється через обмеженість постачання PGM, які визнані критичною сировиною в ЄС та стратегічними в США. За оцінками, відпрацьовані каталізатори забезпечують понад 57% постачання PGM в Європі, роблячи їх ключовим вторинним ресурсом. Однак традиційні методи переробки, такі як пірометалургія, є енергоємними (температури 1500–2000 °C) та генерують токсичні відходи. Гідрометалургія часто вимагає агресивних реагентів (ціаніди), що ускладнює екологічну безпеку. Директиви ЄС, такі як ELV 2000/53/EC, вимагають 95% рівня переробки, але поточні показники рециклінгу (наприклад, 43,21% для Pt у 2022 році) недостатні. Таким чином, актуальною є розробка ефективних, екологічно чистих методів вилучення PGM з SACs для забезпечення стійкого ланцюга постачання та зменшення залежності від первинної видобутку [2, с. 100868].

Платина та інші метали платинової групи (МПП) є критично важливими компонентами каталізаторів для конверсії аміаку в технології виробництва нітратної кислоти. В умовах інтенсивної експлуатації каталізатори втрачають активність через термічні впливи, осадження продуктів побічних реакцій та дію отруйних домішок, що зумовлює необхідність їх регенерації або переробки й повернення дорогоцінного металу у виробничий цикл. В українському науковому середовищі проблема економного вилучення платини з відпрацьованих матеріалів розглядається як актуальна з техніко-економічного та екологічного поглядів [3, с. 5].

У вітчизняних роботах розглядаються два основні підходи: хлорування з подальшим розчиненням хлоросполук платини, а також гідрометалургійні методи – кислотне й лужне вилуговування з подальшою обробкою шламів і концентратів [3, с. 6]. Згідно до хлорного методу, відпрацьований каталізатор піддають прокалюванню, а потім хлоруванню при високих температурах із застосуванням хлоридних або органохлорних агентів (AlCl_3 , SiCl_4 , COCl_2), після чого утворені леткі сполуки абсорбуються й з них відновлюють метал хімічними відновниками. Недоліком є висока енергоємність операцій і корозійна агресивність середовища.

Гідрометалургійні методи передбачають або розчинення носія (Al_2O_3) з наступним концентруванням МПП, або селективне виокремлення компонентів із шламу кислотними/лужними розчинами [4, с. 235]. Кислотне вилуговування за

участю HCl або H_2SO_4 зазвичай проводять після попереднього прокалювання (>800 °C) для видалення органічних домішок; реакції іноді виконують при підвищених температурах і тисках (до 100–140 °C, до 5,0 МПа) для підвищення ступеня вилучення. Лужні схеми включають плавлення шихти з NaOH і подальше вилуговування. Останній варіант дозволяє ефективно розчиняти деякі форми металу, але створює проблему переробки алюмінатних стічних вод.

Практика демонструє, що багатоступенева технологія (обпал, плавлення, вилуговування, сепарація, відновлення) призводить до значних енергетичних витрат і технологічних втрат платини (3–5%). Частотою проблемою є також ускладнення фільтраційних операцій при кислотному розчиненні Al_2O_3 у γ -формі, а також необхідність утилізації або переробки агресивних розчинів (сульфатні, хлоридні, алюмінатні стоки) [5, с. 13]. Ці аспекти підкреслюються як ключові бар'єри для широкомасштабного застосування існуючих методик.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Останні дослідження фокусуються на переході від традиційних методів до зелених технологій вилучення PGM, з акцентом на зменшення енергоспоживання, токсичних відходів та витрат. Комплексні огляди підкреслюють тенденції до інтеграції зеленої хімії в рециклінг, включаючи біометалургію, механохімію, іонні рідини та глибокі евтектичні розчинники (DES). Ці підходи дозволяють досягати високих рівнів вилучення (90–99%) з мінімальним впливом на довкілля [6, с. 119157].

У пірометалургії застосовується плавлення з флюсами (наприклад, CaO , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) та колекторами (Fe, Cu) для формування сплавів PGM, з вилученням $>99\%$, але з високим енергоспоживанням та токсичними викидами. Хлорування (Cl_2/CO при 550 °C) досягає 92,9–95,9% вилучення, але обладнання страждає від корозії. Гідрометалургія, як описано в огляді [7, с. 106222], домінує завдяки прямому вилуговуванню, використовуючи HCl з окиснювачами (H_2O_2 , NaClO) для рекуперації $\sim 100\%$ Pd, 92% Pt та 61% Rh при м'яких умовах (70 °C, 2 год). Допоміжні методи, як мікрохвильове або ультразвукове вилуговування, покращують кінетику (наприклад, 99,74% Pd за 60 хв з NaClO_3).

Зелені альтернативи набирають популярності. Біометалургія використовує мікроорганізми (*Pseudomonas fluorescens*) для біогенних процесів, досягаючи $>95\%$ Pt/Pd без токсичних газів, з перевагами в низькій вартості, але з повільними тем-

пами. Механохімія (кульове подрібнення) активує матеріал з 93,42% вилученням PGM після HCl-вилуговування. Іонні фосфонієві рідини забезпечують селективне вилучення Pd/Pt/Rh.

Недавні дослідження пропонують вилучення з використанням солей літію (Li_2CO_3 , LiF) та HCl, з кальцинацією при 800 °C та вилуговуванням при 180 °C для 104,2% Pt, 94,9% Rh та 97,5% Pd, уникаючи токсичних окиснювачів. Інші інновації включають мікрохвильове плавлення (98,59% Pt) та електрогенероване хлорування (99,6% Pt) [8, с. 90]. Загалом, перспективи спрямовані на гібридні підходи для закриття циклу PGM, з акцентом на пряме використання вилучених металів у нових каталізаторах для зменшення екологічного навантаження та забезпечення стійкості.

Серед розробок українських науковців та інженерів запропоновані варіанти, спрямовані на зниження температури та кількості стадій обробки, зменшення обсягів застосовуваних кислот і підвищення селективності вилучення. Наприклад, у деяких роботах розглядаються способи відновлення активності платиноїдних сіток за допомогою низькотемпературної хлор-повітряної обробки з подальшим прокалюванням, що дозволяє зменшити корозійний вплив і потребу в дорогих корозійностійких матеріалах апаратури [9, с. 150]. Також розробляються електрохімічні методи реставрації покриттів та осадження платини на поверхню елементів, що потенційно можуть знизити потребу у повному вилученні металу з матриці.

Новітні дослідження наголошують на необхідності комплексного підходу, що поєднує технічну ефективність з екологічною безпекою: контроль емісій при прокалюванні й хлоруванні, очищення стічних розчинів після вилуговування, утилізація відходів і енергоефективність процесів [10, с. 6719]. Техніко-економічні оцінки показують, що оптимізація режимів обробки й впровадження регенеративних операцій може знизити сукупні витрати та збільшити віддачу від повернення платини у виробництво.

Українська наука і технологія володіють значним потенціалом у сфері рекуперації платини з відпрацьованих каталізаторів нітратної кислоти. Існуючі методи (хлорування, кислотне та лужне вилуговування, електрохімічна реставрація) мають як переваги, так і суттєві обмеження, пов'язані з енергоємністю, технічною складністю й екологічними ризиками. Подальша робота повинна бути спрямована на розробку енергоефективних технологічних схем, що забезпечать мінімі-

зацію втрат дорогоцінного металу та зменшення впливу на навколишнє середовище. Зокрема, перспективними є низькотемпературні методи обробки, селективні сорбційні технології та електрохімічні підходи, які потребують подальшої дослідно-конструкторської й пілотної перевірки.

На основі аналізу відомих робіт, для підвищення ефективності рекуперації платини доцільно зосередитись на:

- створенні універсальних схем, сумісних з різними модифікаціями носія (α - та γ - Al_2O_3) [11, с. 30];
- розробці низькотемпературних і енергоефективних методів розкладання [12, с. 2895];
- впровадженні селективних сорбційно-сольвентних операцій для попереднього концентрування МПГ [13, с. 235];
- мінімізації утворення токсичних і корозійних продуктів при хлоруванні [14, с. 100112];
- масштабуванні електрохімічних та відновних технологій для промислового застосування [15, с. 140];
- комплексному оцінюванні життєвого циклу технологій з урахуванням екологічних витрат.

Постановка завдання. Мета дослідження – підвищення ефективності рекуперації платини з відпрацьованих каталізаторів.

Виклад основного матеріалу. Як показала практика, для досягнення вилучення платини з відпрацьованих каталізаторів на рівні 98% і більше, під час проведення операцій вилуговування та відмивання нерозчинного залишку, немає необхідності проводити обробку окиснювачем до значення окисно-відновного потенціалу (ОВП) понад 850 мВ. Обробку нітратною кислотою слід проводити до встановлення ОВП у пульпі відносно хлорсрібного електрода порівняння, рівного 780–840 мВ. За таких значень досягається необхідна повнота вилучення платини в розчин. За меншого значення ОВП знижується вилучення платини в розчин. Проведення обробки до значення ОВП понад 840 мВ практично не збільшує вилучення платини в розчин, а призводить до непродуктивної витрати нітратної кислоти та зниження вилучення ренію з розчинів після виділення платини.

Роботу проводили з платиновим каталізатором R-56, що містив платину в кількості 0,3 %. Наважку каталізатора масою 50 г обпалювали в трубчастій печі спочатку при температурі 700 °C, а потім при температурі 1200 °C. Потім огарок розпулювали в 150 см³ 3 М нітратної кислоти, при перемішуванні нагрівали до температури 90–95 °C

і обробляли нітратною кислотою до встановлення заданого значення ОВП у пульпі відносно хлорсрібного електрода порівняння. Пульпу перемішували при заданій температурі протягом 30–40 хвилин, охолоджували та фільтрували. Осад повторно розпульповували в 150 см³ 3 М нітратної кислоти, при перемішуванні обробляли нітратною кислотою до встановлення заданого значення ОВП у пульпі відносно хлорсрібного електрода порівняння, пульпу перемішували протягом 30–40 хвилин і відфільтровували осад. Основний розчин і розчин промивки доводили до об'єму 150 см³ та аналізували. Результати представлені на рис. 1.

При використанні каталізаторів на основі дорогіших або платинових металів метали на носії можуть бути нанесені методом покриття тонким шаром. Зазвичай у каталізаторі кількість металу становить відносно незначну частину. Наприклад, у каталізаторах для очищення вихлопних газів автомобілів вміст металів становить 0,1–0,4% від загальної маси каталізатора. Виділення металів, що знаходяться на носії в настільки низьких концентраціях хімічними методами, наприклад кислотним вилуговуванням, вимагає дуже високих витрат, зумовлених розмірами установки та кількостями використовуваних реагентів.

Один із методів нанесення металу на каталізатор включає покриття носія кордієриту тонким шаром алюміній оксиду, імпрегнованого або послідовно покритого шарами платинових металів або сплавів, наприклад платини, родію або сплавів.

У цій роботі розроблено процес вилучення металів з каталізатора, в якому метали нанесені шляхом

покриття тонким шаром. Для цього зразок відпрацьованого каталізатора для очищення вихлопних газів автомобілів масою 6 г, який номінально містить 0,85% Pt і 0,03% Rh, подрібнювали в кульовій млині до тих пір, поки 50% частинок не мали розмір <35 мкм. Подрібнений матеріал піддавали обробці в мокрому сепараторі. Маса отриманого концентрату склала 27,1%, а маса відходів 72,9% від маси вихідного матеріалу. Концентрат містив 1,05% Pt і 0,04% Rh, а відходи – 0,04% Pt і 0,002% Rh. Таким чином, було вилучено 90% Pt і 89,1% Rh.

У іншому досліді, зразок масою 30,2 г відпрацьованого каталізатора для очищення вихлопних газів автомобілів, який номінально містить 0,22% Pt + Rh, пропускали через лабораторну молоткову дробарку, на виході з якої було розташоване сито з розміром комірок 16 мкм. На сепараторі було отримано 12,5% концентрату, що містить 1,11% Pt і 0,082% Rh. Відходи протягом 20 с подрібнювали в млині і знову направляли в сепаратор, в результаті чого отримували 14,5 % концентрату, що містив 0,20 % Pt, 0,01% Rh і 73% відходів, що містили 0,03% Pt і 0,003% Rh. Таким чином, 88,5% Pt і 89,3% Rh були вилучені в концентрат; обидва концентрати в сумі склали 27% від маси вихідного матеріалу.

Висновки. На основі проведених досліджень щодо вилучення платини з відпрацьованих каталізаторів можна зробити такі висновки:

1. Для досягнення високого рівня вилучення платини (98% і більше) під час операцій вилуговування та відмивання нерозчинного залишку немає потреби в обробці окиснювачем до зна-

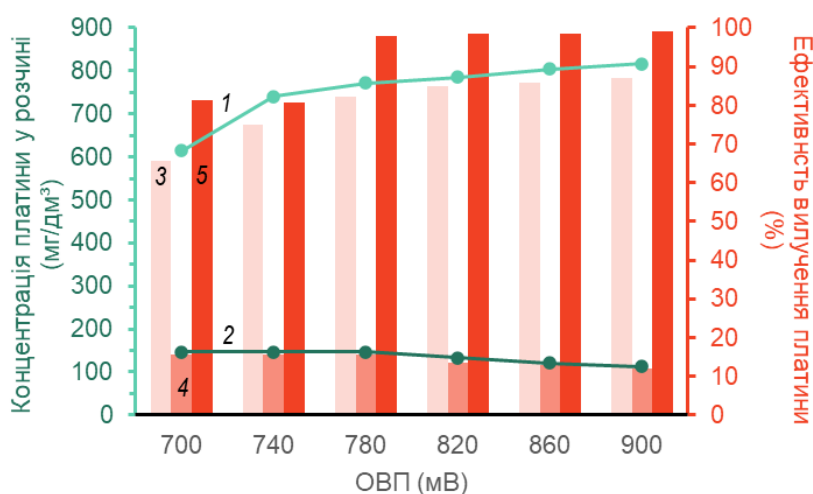


Рис. 1. Залежність ефективності рекуперації платини від ОВП розчину
1 – концентрація платини після першого вилуговування; 2 – концентрація платини після другого вилуговування; 3 – ефективність першого вилуговування; 4 – ефективність другого вилуговування; 5 – загальна ефективність

чення окисно-відновного потенціалу (ОВП) понад 850 мВ. Оптимальне значення ОВП у пульпі відносно хлорсрібного електрода порівняння становить 780–840 мВ, що забезпечує повне вилучення платини в розчин без непродуктивних витрат нітратної кислоти та зниження вилучення ренію.

2. Експеримент з платиновим каталізатором R-56 (з вмістом платини 0,3%) продемонстрував ефективність двостадійного процесу: обпалення при 700 °С та 1250 °С, розпульповування в 3 М нітратній кислоті, нагрівання до 90–95 °С з підтримкою заданого ОВП, перемішування, охолодження та фільтрація. Повторна обробка осаду дозволяє досягти високої ефективності вилучення, результати якої представлено на рис. 1.

3. У каталізаторах на основі дорогіших металів, нанесених тонким шаром (наприклад,

для очищення вихлопних газів автомобілів з вмістом металів 0,1–0,4%), хімічні методи вилучення (як кислотне вилуговування) є витратними через великі обсяги реагентів та обладнання. Альтернативний механічний процес, що включає подрібнення в кульовій або молотковій млині до розмірів частинок <35 мкм або через сито 16 мкм, з подальшою мокрою сепарацією, дозволяє отримати концентрат з високим вмістом Pt і Rh (до 1,05% Pt та 0,04% Rh у першому прикладі).

4. У конкретних прикладах вилучення з відпрацьованих автомобільних каталізаторів досягнуто 88,5–90% Pt та 89,1–89,3% Rh у концентраті, що становить 27% від маси вихідного матеріалу. Це свідчить про ефективність методу для низькоконцентрованих матеріалів, зменшуючи витрати порівняно з хімічними підходами.

Список літератури:

1. Kuzuhara S., Ota M., Kasuya R. Recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts using lithium salts and hydrochloric acid. *Materials*. 2021. V. 14. №. 22. P. 6843. <https://doi.org/10.3390/ma14226843>
2. Kukurugya F., Wouters W., Spooren J. Microwave-assisted chloride leaching for efficient recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts: An approach for chemical reagent reduction. *Cleaner Engineering and Technology*. 2025. V. 24. P. 100868. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100868>
3. Jha M. K. et al. Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review. *Hydrometallurgy*. 2013. V. 133. P. 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.11.012>
4. Лобойко О. Я. та ін. Платиноїдний каталізатор окиснення аміаку. Механізм утворення та уловлювання втрат. *Хімічна промисловість України*. 2016. № 1 (132). С. 3–6.
5. Rasmussen S. B. et al. Characterization and regeneration of Pt-catalysts deactivated in municipal waste flue gas. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2006. V. 69. №. 1-2. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.05.009>
6. Alcala R. et al. Strategies for regeneration of Pt-alloy catalysts supported on silica for propane dehydrogenation. *Applied Catalysis A: General*. 2023. V. 658. P. 119157. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2023.119157>
7. Kinas S. et al. On the path of recovering platinum-group metals and rhenium: A review on the recent advances in secondary-source and waste materials processing. *Hydrometallurgy*. 2024. V. 223. P. 106222. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106222>
8. Liu K., Qiu Y., Li Y. Preparation of high purity platinum nitrate using spent Pt-Rh catalyst from the production of nitric acid. *Journal of Central South University*. 2023. V. 30. P. 85–94. <https://doi.org/10.1007/s11771-022-5214-3>
9. James D. et al. Catalytic decomposition/regeneration of Pt/Ba (NO₃)₂ catalysts: NO_x storage and reduction. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2003. V. 45. №. 2. P. 147–159. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00123-1](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00123-1)
10. Fang C., Harold M. P. Low temperature NH₃ regeneration of a sulfur poisoned Pt/Al₂O₃ monolith catalyst. *Catalysis Science & Technology*. 2023. V. 13. №. 23. C. 6718–6732. <https://doi.org/10.1039/D3CY01153D>
11. Cumaranatunge L. et al. Ammonia is a hydrogen carrier in the regeneration of Pt/BaO/Al₂O₃ NO_x traps with H₂. *Journal of Catalysis*. 2007. V. 246. №. 1. P. 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2006.11.008>
12. Han S. B. et al. High-Performance Chemically Regenerative Redox Fuel Cells Using a NO₃–/NO Regeneration Reaction. *Angewandte Chemie International Edition*. 2017. V. 56. №. 11. P. 2893–2897. <https://doi.org/10.1002/anie.201610738>
13. Ruan M. et al. Regeneration and enhanced catalytic activity of Pt/C electrocatalysts. *ACS Catalysis*. 2015. V. 5. №. 1. P. 233–240. <https://doi.org/10.1021/cs5013427>
14. Yakoumis I. et al. Recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. V. 3. P. 100112. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100112>
15. Chen C. H. et al. Electrochemical characterization and regeneration of sulfur poisoned Pt catalysts in aqueous media. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2018. V. 816. P. 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.03.015>

**Shkoda V.O., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. RESEARCH
ON THE REGULARITIES OF PLATINUM RECOVERY FROM SPENT CATALYSTS
IN NITRIC ACID PRODUCTION**

Platinum catalysts are mainly used for the production of nitric acid via the catalytic oxidation of ammonia with atmospheric oxygen. During usage, their efficiency decreases owing to the deposition of sediments on the catalyst. Various methods have been used for the regeneration of spent catalysts to restore their efficiency. This study investigated the conditions for the extraction of Pt from spent catalysts by leaching with nitric acid. It has been established that to achieve a Pt extraction of 98% or more, it is sufficient to maintain the oxidation-reduction potential (ORP) in the pulp at 780–840 mV relative to the silver chloride reference electrode, which avoids unproductive reagent consumption and a decrease in rhenium extraction. Experiments were conducted with the R-56 platinum catalyst (0.3% Pt), including calcination at 700 °C and 1250 °C, two-stage leaching in 3 M nitric acid at 90–95 °C, followed by filtration and analysis. In addition, catalysts based on precious metals applied in a thin layer (for cleaning automobile exhaust gases containing 0.1–0.4% metals) were considered, where chemical extraction methods are costly. A mechanical process has been developed: grinding in a ball or hammer mill to particle sizes <35 µm or through a 16 µm sieve with wet separation. In the examples, 88.5–90% Pt and 89.1–89.3% Rh were recovered from the concentrate, which is 27% of the mass of the starting material. This study proposes effective methods for processing spent catalysts to optimise resources and reduce environmental impacts. The research results relate to the field of non-ferrous and precious metal metallurgy, in particular to methods for extracting platinum group metals and rhenium from deactivated (spent) catalysts, which can be used in the processing of secondary raw materials. The results obtained allow for the optimisation of resource consumption, increase the efficiency of platinum metal extraction, and can be used in industry in the processing of spent catalysts to reduce the environmental impact and save raw materials.

Key words: *platinum, catalyst, leaching, grinding, selectivity, regeneration.*

Дата надходження статті: 05.11.2025

Дата прийняття статті: 21.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 621.894
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/34>

Шохін М.В.

Дніпровський державний технічний університет

Гуляєв В.М.

Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А.Л.

Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛАСТОМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ ІЗ МІНЕРАЛЬНИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ

У роботі було досліджено теплопровідність систем на основі кремнійорганічного полімеру та мінеральних наповнювачів залежно від хімічного складу, кількості та дисперсності останніх. Представлено результати дослідження впливу порошкоподібних мінеральних наповнювачів на теплофізичні властивості вулканізованих композицій на основі низькомолекулярного диметилсилоксанового каучуку марки А в температурному інтервалі 50–300 °С. В якості наповнювачів використовували оксид цинку (ZnO), ферум(III) оксид (Fe_2O_3), оксид титану (TiO_2) і оксид кремнію (SiO_2) різної дисперсності (кварц і «біла сажка»). Встановлено, що з підвищенням температури коефіцієнт теплопровідності ненаповненого еластомеру зменшується внаслідок переходу полімеру у високоеластичний стан, що супроводжується збільшенням вільного об'єму між молекулярними ланцюгами та зростанням внутрішнього теплового опору. Аналіз температурної залежності питомої теплоємності показав наявність екзотермічних процесів при температурах вище 220 °С, пов'язаних із виділенням низькомолекулярних фракцій полімеру. Виявлено суттєвий вплив адсорбованої вологи на теплові характеристики композицій: процеси десорбції та випаровування води за температур понад 100 °С спричиняють підвищення теплоємності матеріалу. Встановлено, що додавання мінеральних наповнювачів забезпечує зростання коефіцієнта теплопровідності еластомерів, причому для всіх систем спостерігається майже лінійна залежність теплопровідності від температури. Найвищі значення цього показника мають композиції, наповнені оксидом цинку, завдяки його значній теплопровідності. Зі збільшенням вмісту наповнювача до 15 об.% теплопровідність зростає практично лінійно, тоді як подальше підвищення концентрації призводить до зростання контактного опору на межі еластомер–наповнювач і уповільнення теплопередачі. Встановлено, що дисперсність частинок наповнювача є важливим чинником, який визначає ефективність перенесення теплоти: зі зменшенням розміру частинок та збільшенням кількості активних центрів на їх поверхні знижується контактний опір і формується більш розвинена система теплопровідних містків у полімерній матриці. Отримані результати свідчать про можливість цілеспрямованого керування теплофізичними характеристиками еластомерів шляхом вибору типу та дисперсності мінеральних наповнювачів, що має практичне значення для створення термостійких і теплопровідних полімерних матеріалів нового покоління.

Ключові слова: еластомер, мінеральний наповнювач, коефіцієнт температуропровідності, теплоємність, дисперсність.

Постановка проблеми. При виготовленні герметиків, гум та інших матеріалів на основі кремнійорганічних еластомерів застосовують високодисперсні мінеральні наповнювачі, в тому числі оксиди металів. Введення наповнювачів істотно змінює не тільки механічні та хімічні, але й теплофізичні властивості вулканізатів типу СКТН [1, с. 36]. На тепло-

фізичні властивості вулканізатів впливає характер взаємодії еластомеру з наповнювачем, що визначається хімічною природою, дисперсністю, формою і активністю поверхні частинок наповнювача. При наявності активних центрів на поверхні частинок і реакційноздатних груп в молекулі еластомеру між ними можуть виникати хімічні зв'язки [2, с. 123].

Дані про температурну залежність теплофізичних властивостей матеріалів на основі кремнійорганічних еластомерів обмежені, доступні, в основному, значення коефіцієнта теплопровідності деяких кремнійорганічних гум [3, с. 102]. Відомо, що теплопровідність гуми мало залежить від типу кремнійорганічного каучуку.

Вивчення та аналіз залежності теплофізичних властивостей наповнених еластичних кремнійорганічних матеріалів у температурному інтервалі їх працездатності, верхня межа якого досягає 300 °С, можуть виявитися корисними для пояснення структури композиційних матеріалів та оцінки характеру взаємодії наповнювачів з еластомером. Літературні дані про температурну залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалів на основі кремнійорганічних еластомерів вкрай обмежені. У роботі [4, с. 115] наводяться його значення для деяких кремнійорганічних гум; там же показано, що вид кремнійорганічного каучуку практично не впливає на теплопровідність гуми і остання повністю залежить від типу наповнювача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Еластомери мають відносно низьку теплопровідність через аморфну структуру полімерної матриці; це обмежує їх застосування в компонентах, де важлива тепловіддача або термостабільність. Додавання мінеральних наповнювачів – традиційний підхід для модифікації механічних, електричних і теплофізичних властивостей композицій на основі каучуків і силіконів [5, с. 3555].

ZnO (оксид цинку) часто використовується в складах еластомерів не тільки як наповнювач, але й як активатор вулканізації; він впливає на кінетику сушки/зшивання та на кінцеву структуру сітки, що опосередковано змінює теплопровідність та термостійкість матеріалу. Додатково, при введенні ZnO у вигляді наночастинок спостерігають підвищення теплопровідності й стабільності властивостей після термічного старіння за рахунок кращої передачі тепла по наповнювачевих ланцюгах та збільшення щільності зшитої сітки [6, с. 5289; 7, с. 125].

TiO₂ (оксид титану) часто застосовуваний білий наповнювач, що збільшує жорсткість і може підвищувати теплопровідність полімерних матриць, особливо в нано- або субмікронному розмірі частинок. Крім того, TiO₂ впливає на термостійкість та оптичні властивості (наприклад, відбиття в ІЧ-діапазоні), що важливо для застосувань із тепловим менеджментом та сонячним випромінюванням. Однак агрегація частинок і фотокаталітична активність (анатазна фаза) можуть

вимагати модифікації поверхні (наприклад, SiO₂-оболонкою) для уникнення деградації полімеру [8, с. 100449; 9, с. 20119].

SiO₂ (оксид кремнію) широко застосовується для поліпшення механічних і термофізичних властивостей еластомерів: тонкодисперсна силіка підвищує модуль пружності, зменшує газопроникність та сприяє формуванню теплопровідних шляхів при достатній концентрації і гарному змочуванні матрицею. Покриття поверхні еластомерів шаром SiO₂ також застосовують для покращення дисперсії та зниження небажаної хіміко-фотокаталітичної активності [10, с. 3362; 11, с. 3767].

Fe₂O₃ (ферум(III) оксид) зустрічається в гумових сумішах рідше, ніж SiO₂ або ZnO, але використовується коли потрібні підвищена щільність, магнітні властивості або додаткове підвищення термостійкості. Вплив Fe₂O₃ на теплопровідність залежить від розміру частинок та їх розподілу – при добрій дисперсії оксид заліза здатен підвищити локальні шляхи теплопровідності, але можливі й негативні ефекти через агрегацію [12, с. 277; 13, с. 29673].

Синергія наповнювачів і фактори, що впливають на теплові характеристики. Ключові параметри: об'ємна частка наповнювача, розмір і форма частинок, адгезія «напівматриця», поверхнева модифікація (силанізація, SiO₂-коутинг), сумішеві системи (комбінації оксидів або додавання вуглецевих наповнювачів). Правильне поєднання (наприклад, SiO₂ для дисперсії + TiO₂ або ZnO для підвищення провідності) часто дає кращий результат, ніж одиночний наповнювач. Також важливі технологічні чинники – процес перемішування, температура вулканізації та можливість формування «кондуктивних ланцюгів» частинок усередині композиту [14, с. 106466].

Постановка завдання. Метою даної роботи було дослідження впливу мінеральних наповнювачів різного хімічного складу та їх вмісту на теплопровідність вулканізованих композицій на основі низькомолекулярного диметилполісилоксанового каучуку СКТН марки А в температурному інтервалі 20–300 °С. Вибір наповнювачів визначався головним чином їх застосовністю в гумах, герметиках і компаундах на основі цього каучуку (ZnO, Fe₂O₃, TiO₂), а також різницею дисперсності при практично однаковому хімічному складі (пилоподібний кварц і «біла сажа»). З огляду на те, що досліджувані наповнювачі мають різну щільність, визначення їх впливу на теплопровідність композицій проводилося при однакових об'ємних частках.

Виклад основного матеріалу. Основні фізико-хімічні характеристики наповнювачів, які були досліджені в даній роботі, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1
Фізико-хімічні характеристики деяких наповнювачів

Наповнювач	Густина, кг/м ³	Площа питомої поверхні, м ² /г
SiO ₂ («біла сажа»)	2200	47
SiO ₂ (кварц)	2200	5
ZnO	5600	16
Fe ₂ O ₃	5700	-
TiO ₂	4300	47

У роботі були використані наступні позначення: λ – коефіцієнт теплопровідності композицій; λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності сполучного і включень відповідно; t – температура; n – об’ємна концентрація наповнювача; $v = \lambda_2/\lambda_1$.

Коефіцієнт теплопровідності λ , питому теплоємність c і коефіцієнт температуропровідності α композицій визначали стандартною методикою [3, с. 122].

Досліди показали, що зміна коефіцієнта теплопровідності ненаповненого вулканізату СКТН і його композицій з різним об’ємним вмістом наповнювача зі збільшенням температури добре апроксимується лінійною залежністю (рис. 1–5), що узгоджується з літературними даними [2, с. 53].

Зменшення коефіцієнта теплопровідності матеріалу, що перебуває у високоеластичному стані, зі зростанням температури можна пояснити збільшенням відстані між молекулярними ланцюгами еластомеру (вільного об’єму) і, відповідно, зростанням внутрішнього теплового опору.

Характер зміни питомої теплоємності ненаповненого вулканізату СКТН при температурах вище 220 °С свідчить про перебіг екзотермічних процесів, пов’язаних із виділенням низькомолекулярних фракцій полімеру. При введенні наповнювачів (окрім «білої сажі») максимальні значення питомої теплоємності спостерігаються за тих самих температур, що й для ненаповненого вулканізату.

На температурну залежність питомої теплоємності досліджуваних композицій істотно впливає адсорбована волога. Для визначення її кількості

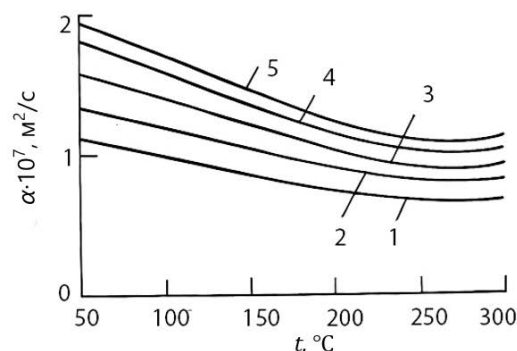
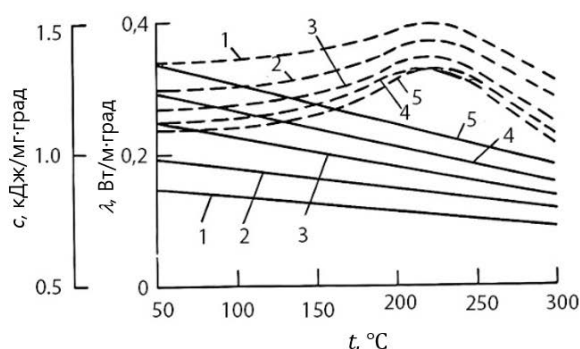


Рис. 1. Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності λ (суцільна лінія), теплоємність c (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності α композицій на основі СКТН з різним об’ємним вмістом TiO₂: 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %

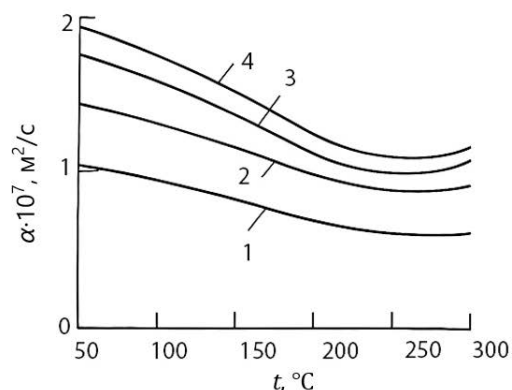
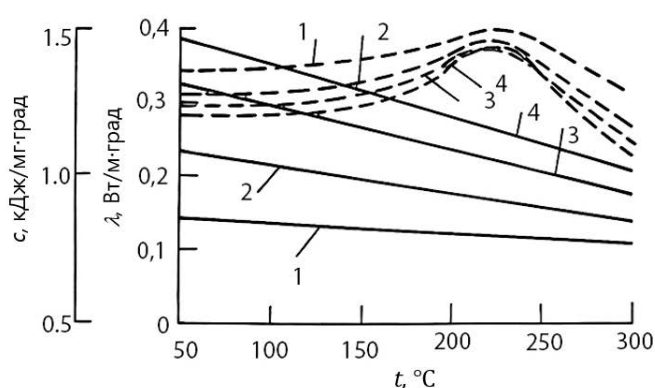


Рис. 2. Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності λ (суцільна лінія), теплоємність c (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності α композицій на основі СКТН з різним об’ємним вмістом ZnO: 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %.

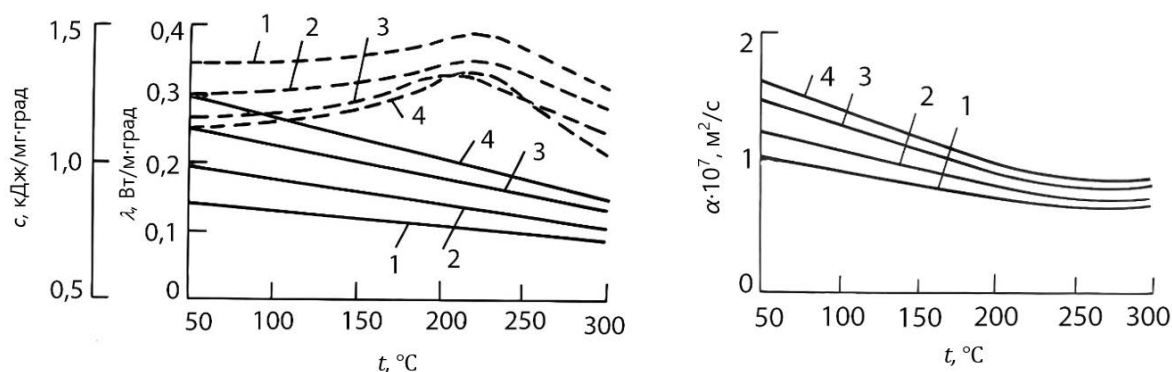


Рис. 3. Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності λ (суцільна лінія), теплоємність c (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності α композицій на основі СКТН з різним об'ємним вмістом Fe_2O_3 : 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %

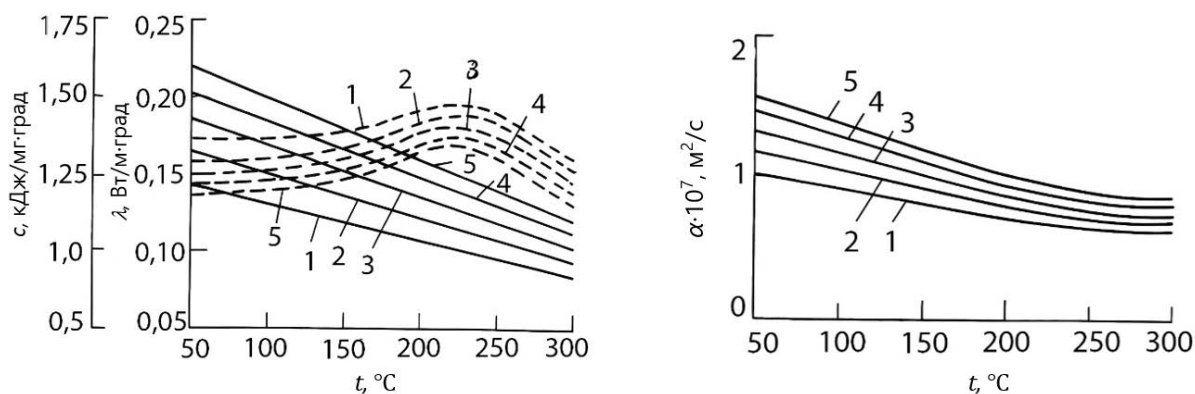


Рис. 4. Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності λ (суцільна лінія), теплоємність c (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності α композицій на основі СКТН з різним об'ємним вмістом SiO_2 (кварц): 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %

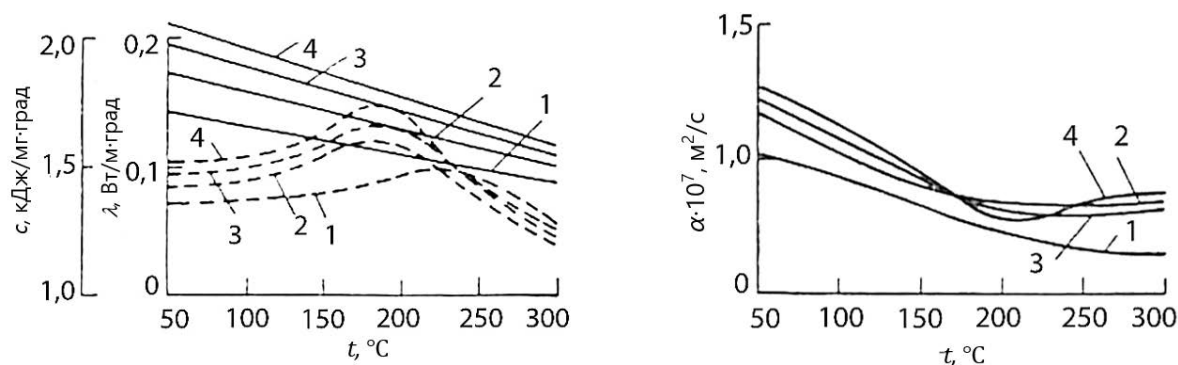


Рис. 5. Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності λ (суцільна лінія), теплоємність c (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності α композицій на основі СКТН з різним об'ємним вмістом SiO_2 («біла сажа»): 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %

зразки порошкоподібного наповнювача (~1 г) поміщали у бюкси та зважували на аналітичних терезах із точністю $\pm 0,0001$ г. Бюкси прожарювали в печі при 300 °C упродовж 30 хв, закривали притертою кришкою і знову зважували після

охолодження. Після цього бюкси відкривали та повторно зважували через 24 год. За ступенем відновлення початкової маси визначали кількість вологи, адсорбованої порошкоподібними наповнювачами (таблиця 2).

Таблиця 2

Орієнтовний вміст води у досліджених наповнювачах

Наповнювач	Втрати маси при прожарюванні, %	Відновлення початкової маси, %
SiO ₂ («біла сажа»)	6,56	99,9
SiO ₂ (кварц)	0,25	99,8
ZnO	3,58	98,6
Fe ₂ O ₃	1,13	99,5
TiO ₂	1,21	99,7

Оскільки після прожарювання початкова маса зразка відновлюється майже повністю, можна зробити висновок, що під час термообробки випаровується вода, адсорбована на поверхні частинок наповнювача. Найбільш виражену здатність до адсорбції (до 6,5 %) має «біла сажа». Процеси випаровування та десорбції води, що відбуваються у композиціях за температур вище 100 °С, спричиняють підвищення їх теплоємності. Чим більше випарованої води, тим значніша зміна теплоємності композицій.

Температуропровідність досліджених систем (за винятком композицій, наповнених «білою сажею») у температурному діапазоні до 200 °С зменшується; при цьому її температурна залежність є близькою до лінійної, що апроксимується рівнянням типу:

$$\lambda = at + b, \quad (1)$$

де a і b – сталі коефіцієнти.

На рис. 6 показано вплив вмісту різних мінеральних наповнювачів на коефіцієнт теплопровідності систем на основі СКТН. Зі збільшенням кількості наповнювача до 15 об.% на 100 об.% СКТН теплопровідність композицій зростає практично лінійно. При подальшому підвищенні концентрації через збільшення в'язкості системи зростає контактний опір на межі еластомер–наповнювач, що уповільнює подальше зростання теплопровідності.

Дисперсність наповнювача також впливає на величину коефіцієнта теплопровідності композиції. Із підвищенням дисперсності зростає роль поверхневих явищ на межі поділу фаз. Збільшення кількості активних центрів на поверхні частинок наповнювача сприяє утворенню хімічних зв'язків у системі, внаслідок чого контактний опір на межі фаз зменшується, а коефіцієнт теплопровідності – зростає.

Визначення коефіцієнта теплопровідності проводили при монотонному підвищенні температури зразків. Експериментальна установка являла

собою плоский калориметр із двома ідентичними зразками, розташованими симетрично між двома плоскими нагрівачами та центральним калориметричним елементом [15, с. 255]. Відносна похибка вимірювання коефіцієнта теплопровідності становила 6–8 %.

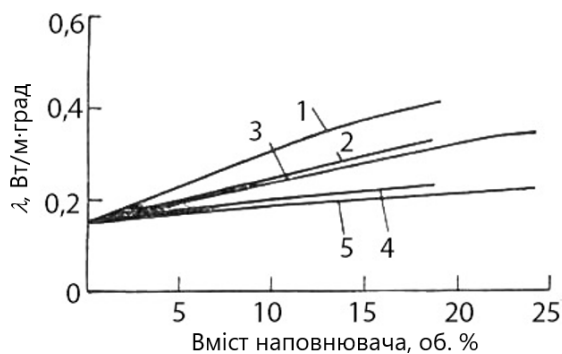


Рис. 6. Вплив вмісту мінерального наповнювача на коефіцієнт теплопровідності композицій СКТН: 1 – ZnO; 2 – Fe₂O₃; 3 – TiO₂; 4 – SiO₂ («біла сажа»); 5 – SiO₂ (кварц)

На рис. 7 наведено значення коефіцієнта теплопровідності ненаповненого вулканізату СКТН та композицій із різним вмістом оксиду титану. У досліджуваному температурному інтервалі зміна коефіцієнта теплопровідності добре апроксимується лінійною функцією від температури.

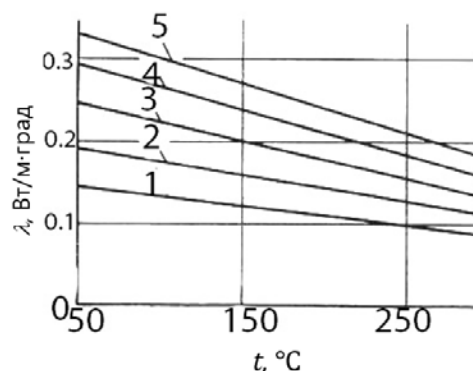


Рис. 7. Залежність коефіцієнта теплопровідності композицій, наповнених TiO₂, від температури: 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %

Температурна залежність теплопровідності композицій з іншими наповнювачами також є лінійною. Подібний характер температурної залежності теплопровідності силіконових каучуків відзначено в роботі [11, с. 3767].

Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури можна пояснити, використовуючи модель, запропоновану в [16, с. 133]. Встановлено, що при підвищенні температури для поліме-

рів у склоподібному стані теплопровідність дещо зростає, а після переходу у високоеластичний стан, унаслідок теплових флуктуацій макромолекул, що збільшують відстань між молекулярними ланцюгами (вільний об'єм), коефіцієнт теплопровідності зменшується. Це положення експериментально підтверджено в роботах [7, 9, 12], де досліджувалася температурна залежність теплопровідності лінійних слабкозшитих тривимірних полімерів. Досліджувані в цій роботі композиції належать до лінійних слабкозшитих полімерів, температура склоподібного переходу яких лежить у ділянці від'ємних температур.

При аналізі процесів теплоперенесення у багатокомпонентних системах для розрахунку коефіцієнтів теплопровідності зазвичай застосовують макроскопічний підхід, що передбачає розгляд матеріалу як суцільного середовища та ігнорування атомно-молекулярної будови речовини [8, с. 100449]. Такий підхід дозволяє встановити залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності системи від її структури, теплопровідності компонентів, їх концентрацій та оцінити вплив окремих факторів на теплопровідність матеріалу. При цьому приймається низка спрощень: відсутність термічного опору на межі поділу компонентів, незмінність коефіцієнтів теплопровідності чистих речовин у суміші тощо. Однак при змішуванні під дією наповнювача може змінюватися надмолекулярна структура полімеру, що позначається на теплопровідності композицій.

Розгляд аналітичних залежностей [1, с. 20] для структур із ізольованими замкненими включеннями показує, що однією з найзагальніших є формула:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = 1 - n \left(\frac{1}{1 - \nu} - \frac{1 - n}{3} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Враховуючи, що принцип узагальненої провідності базується на ідеалізованих модельних структурах, запропоновано емпіричну залежність для розрахунку ефективного теплопровідності двофазних систем [1, с. 25]:

$$\lambda = a\lambda_{cm} + b\lambda'_{cm}. \quad (3)$$

де λ'_{cm} і λ_{cm} – значення, обчислені за формулою (2), якщо наповнювачем вважати речовину спочатку з більшою, а потім із меншою теплопровідністю. Для силіконових каучуків коефіцієнти a та b приймають рівними 0,2 і 0,8 відповідно.

На рис. 8 наведено результати експериментального визначення коефіцієнта теплопровідності композицій залежно від об'ємного вмісту TiO_2 , а також значення цього коефіцієнта, розраховані за формулами (2) та (3).

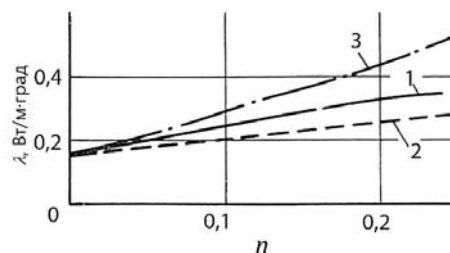


Рис. 8. Порівняння експериментальних та розрахункових даних коефіцієнта теплопровідності композицій, наповнених TiO_2 : 1 – експериментальні дані; 2 – розрахунок за формулою (2); 3 – за формулою (3)

При об'ємній концентрації $n < 0,1$ краща узгодженість із експериментом досягається для залежності (3), тоді як при $n > 0,1$ – для формули (2). Із подальшим збільшенням n розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними зростає і при $n \approx 0,25$ сягає 30 %. Це свідчить про неповну відповідність обраної моделі реальній структурі системи еластомер–наповнювач. Зокрема, порівняння результатів показує, що між молекулами диметилполісілоксану та наповнювачем, як і у випадку органічних каучуків [00], існує певна хімічна взаємодія; крім того, можливе формування контактів між окремими частинками наповнювача, що за $\lambda_2 > \lambda_1$ призводить до зниження термічного опору композиції.

Розрахункові значення коефіцієнта теплопровідності, отримані з емпіричної залежності (3), можна наблизити до експериментальних шляхом корекції числових коефіцієнтів a та b . Так, при $a = 0,15$ і $b = 0,7$ відхилення розрахункових і експериментальних даних у всьому діапазоні концентрацій не перевищує 5 %.

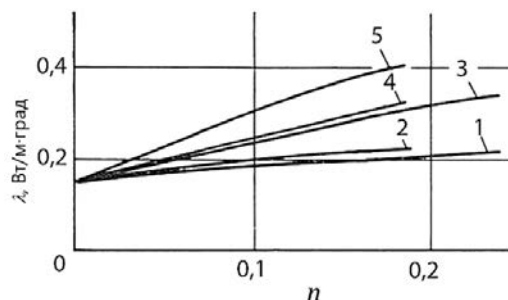


Рис. 9. Залежність коефіцієнта теплопровідності композицій від об'ємного вмісту наповнювача: 1 – SiO_2 (кварц); 2 – SiO_2 («біла сажа»); 3 – TiO_2 ; 4 – Fe_2O_3 ; 5 – ZnO

На рис. 9 наведено залежності коефіцієнта теплопровідності систем із різними мінеральними наповнювачами від їх вмісту. Для $n < 0,15$ ця залежність наближається до лінійної, а при

$n > 0,15$ зростання теплопровідності дещо сповільнюється, що можна пояснити виникненням локальних контактних опорів між частинками наповнювача та еластомером. Найвищу теплопровідність мають системи, що містять оксид цинку, оскільки цей наповнювач характеризується найбільшою власною теплопровідністю серед розглянутих мінеральних сполук.

Дисперсність наповнювача істотно впливає на теплопровідність композиції. Експериментально встановлене підвищення коефіцієнта теплопровідності зі зменшенням розміру частинок (за сталого об'ємного вмісту наповнювача), ймовірно, зумовлене інтенсифікацією поверхневих явищ на межі поділу фаз. Активні центри на поверхні частинок білої сажі утворюють хімічні зв'язки з молекулами еластомеру, підвищуючи ступінь зшивки; при достатній кількості таких центрів частинки наповнювача можуть бути включеними в тривимірну структуру вулканізату, виконуючи роль теплопровідних «містків» між макромолекулами еластомеру.

Висновки.

1. Мінеральні оксиди (ZnO, TiO₂, SiO₂, Fe₂O₃) – ефективні засоби для корекції теплофізичних і суміжних властивостей еластомерів. ZnO також виступає як активатор вулканізації; SiO₂ – ключ для механічної зміцненості та дисперсії; TiO₂ може підвищувати теплопровідність й надавати корисні оптичні властивості; Fe₂O₃

застосовують для специфічних задач (щільність, магнетизм, термостійкість).

2. Температурна поведінка теплофізичних характеристик еластомерних композицій визначається структурним станом полімерної матриці та природою мінерального наповнювача. При переході еластомеру у вискоеластичний стан зі зростанням температури коефіцієнт теплопровідності зменшується через збільшення вільного об'єму і внутрішнього теплового опору.

3. Введення мінеральних наповнювачів (ZnO, TiO₂, SiO₂, Fe₂O₃) сприяє підвищенню теплопровідності композицій. Найбільш ефективним наповнювачем виявився оксид цинку, що має найвищу власну теплопровідність. Зі збільшенням концентрації наповнювача до 15 об.% спостерігається майже лінійне зростання теплопровідності, яке уповільнюється при більшому наповненні через підвищення в'язкості системи та зростання контактного опору на межі еластомер–наповнювач.

4. Дисперсність і поверхнева активність частинок наповнювача істотно впливають на теплопровідність композицій. Зменшення розміру частинок і збільшення кількості активних центрів на їх поверхні знижують контактний тепловий опір, сприяють утворенню хімічних зв'язків між еластомером і наповнювачем та підвищують ступінь зшивки полімерної сітки, що призводить до зростання ефективної теплопровідності матеріалу.

Список літератури:

1. Салєєва А.Д., Солнцева І.Л., Белєвцова Л.О., Носова Т.В., Семенець В.В.. Виробничі технології та матеріали. Харків : ХНУРЕ, 2022. 92 с.
2. Миронюк О.В., Савченко Д.О., Мельник Л.І. Спеціальні розділи хімічної технології переробки полімерів. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : 2023. 294 с.
3. Дегула А. І., Харченко Н. А. Сучасні тенденції в матеріалознавстві : конспект лекцій. Суми : Сумський державний університет, 2024. 137 с.
4. Передові композитні матеріали та супергідрофобні поверхні : підруч. / О. В. Миронюк та ін: Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 229 с.
5. Mirizzi L. et al. Tailoring the thermal conductivity of rubber nanocomposites by inorganic systems: opportunities and challenges for their application in tires formulation. *Molecules*. 2021. V. 26. №. 12. P. 3555. <https://doi.org/10.3390/molecules26123555>
6. Alam M. N., Kumar V., Park S. S. Advances in rubber compounds using ZnO and MgO as co-cure activators. *Polymers*. 2022. V. 14. №. 23. P. 5289. <https://doi.org/10.3390/polym14235289>
7. Mu Q., Feng S., Diao G. Thermal conductivity of silicone rubber filled with ZnO. *Polymer Composites*. 2007. V. 28. №. 2. P. 125–130. <https://doi.org/10.1002/pc.20276>
8. Naphon P., Wiriyasart S., Naphon N. Thermal, mechanical, and electrical properties of rubber latex with TiO₂ nanoparticles. *Composites Communications*. 2020. V. 22. P. 100449. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100449>
9. Wang L. et al. Surface-modified TiO₂@ SiO₂ nanocomposites for enhanced dispersibility and optical performance to apply in the printing process as a pigment. *ACS Omega*. 2023. V. 8. №. 22. P. 20116–20124. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02679>
10. Yangthong H. et al. Hybrid Alumina–Silica Filler for Thermally Conductive Epoxidized Natural Rubber. *Polymers*. 2024. V. 16. №. 23. P. 3362. <https://doi.org/10.3390/polym16233362>
11. Lee M. H. et al. The effect of SiO₂ shell on the suppression of photocatalytic activity of TiO₂ and ZnO nanoparticles. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2012. V. 33. №. 11. P. 3767–3771. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2012.33.11.3767>

12. Jeong Y. et al. Preparation of $\text{TiO}_2/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3@ \text{SiO}_2$ Nanorod Heterostructures and Their Applications for Efficient Photodegradation of Methylene Blue. *Crystals*. 2025. V. 15. №. 3. P. 277. <https://doi.org/10.3390/cryst15030277>
13. Mokhtarifar M. et al. Heterostructured $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{rGO}$ coating with highly efficient visible-light-induced self-cleaning properties for metallic artifacts. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. V. 12. №. 26. P. 29671–29683. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c06792>
14. Anbupalani M. S. et al. Utilisation of $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mechanical blends for enhancing the photovoltaic efficiency in polycrystalline silicon solar cells. *Surfaces and Interfaces*. 2025. V. 65. P. 106466. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106466>
15. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с.
16. Мельник Л.І. Технологія переробки еластомерів: навч. Посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 257 с.

Shokhin M.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. STUDYING THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ELASTOMERIC COMPOSITIONS WITH MINERAL FILLERS

This study investigated the thermal conductivity of systems based on organosilicon polymers and mineral fillers, depending on the chemical composition, quantity, and dispersibility of the latter. The results of the study on the influence of powdered mineral fillers on the thermophysical properties of vulcanized compositions based on low-molecular-weight dimethylsiloxane rubber grade A in the temperature range of 50–300 °C are presented. Zinc oxide (ZnO), iron(II) oxide (Fe_2O_3), titanium oxide (TiO_2), and silicon oxide (SiO_2) with various dispersibilities (quartz and “white soot”) were used as the fillers. It was found that with an increase in temperature, the thermal conductivity coefficient of the unfilled elastomer decreased owing to the transition of the polymer to a highly elastic state, accompanied by an increase in the free volume between molecular chains and an increase in the internal thermal resistance. Analysis of the temperature dependence of the specific heat capacity showed the presence of exothermic processes at temperatures above 220 °C, associated with the release of low-molecular-weight polymer fractions. The significant influence of adsorbed moisture on the thermal characteristics of the compositions was revealed: the processes of desorption and evaporation of water at temperatures above 100 °C caused an increase in the heat capacity of the material. It was established that the addition of mineral fillers increases the thermal conductivity coefficient of elastomers, with an almost linear dependence of the thermal conductivity on temperature observed for all systems. The highest values of this indicator were found in compositions filled with zinc oxide owing to its high thermal conductivity. When the filler content was increased to 15 vol. %, thermal conductivity increases almost linearly, while a further increase in concentration leads to an increase in contact resistance at the elastomer-filler interface and a slowdown in heat transfer. It has been established that the dispersibility of filler particles is an important factor determining the efficiency of heat transfer. As the particle size decreases and the number of active centers on the surface increases, the contact resistance decreases, and a more developed system of heat-conducting bridges is formed in the polymer matrix. The results obtained indicate the possibility of targeted control of the thermophysical characteristics of elastomers by selecting the type and dispersibility of mineral fillers, which is of practical importance for the development of a new generation of heat-resistant and heat-conducting polymer materials.

Key words: elastomer, mineral filler, thermal conductivity, heat capacity, dispersibility.

Дата надходження статті: 21.10.2025

Дата прийняття статті: 10.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 656.025.4::004.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/35>**Волохов О.О.**

Одеський національний морський університет

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ У ПЕРЕВЕЗЕННЯХ РЕФРИЖЕРАТОРНИХ КОНТЕЙНЕРІВ: ВІД RFID ДО БЛОКЧЕЙНУ

У сучасних умовах посилення глобальної економічної взаємозалежності, ефективність та прозорість міжнародних логістичних операцій, особливо у сфері перевезення швидкопсувних вантажів, набувають критичного значення. Тенденції глобальної цифровізації усіх сфер суспільної життєдіяльності зумовлюють формування нових моделей взаємин у межах мережі ланцюга поставок. Інтеграція інформаційно-комунікаційних систем у перевезення рефрижераторних контейнерів дозволяє автоматизувати системи управління та логістики з метою оптимізації процесу транспортування та відстеження умов перевезення, асиміляції з системами контролю температурного режиму, гарантії їх безпеки. Метою дослідження є розширений аналіз потенціалу використання інформаційних систем у перевезеннях рефрижераторних контейнерів. У статті розглянуто ключові переваги автоматизації перевезення, зокрема, підвищення ефективності, зменшення витрат, оптимізація безпечового середовища та формування конкурентних переваг. Узагальнено ключові напрями використання інформаційних систем у контейнерній логістиці. Проаналізовано можливості технології блокчейн у перевезеннях рефрижераторних контейнерів в контексті підвищення прозорості, безпеки та ефективності процесу, відстеження матеріальних потоків у режимі реального часу, мінімізації ризиків помилок та недобросовісних дій, вдосконалення системи документообігу за допомогою смарт-контрактів, оптимізації управління ризиками. В якості методологічної основи адаптовано модель TOI (технологічний, організаційний, інституційний вплив). Дослідження висвітлює чинники впливу на впровадження блокчейн-технологій у технологічних, організаційних та інституційних аспектах. Відзначено вплив інституційного середовища фірми (TOI) на успішне впровадження блокчейн-технологій у сферу перевезень рефрижераторних контейнерів. Доведено, що розглянуті інформаційні конструкції позиціонуються перспективним базисом для глибших досліджень критичних чинників інтеграції блокчейн-технологій у галузі вантажної логістики.

Ключові слова: логістика, перевезення рефрижераторних контейнерів, інформаційні системи, блокчейн, ланцюг постачання, фактори TOI.

Постановка проблеми. Зважаючи на стрімку цифровізацію усіх напрямків економічної діяльності та пріоритетність циркулярної цифрової економіки в глобальному масштабі, особливої значущості набуває формування стійких бізнес-моделей. Сучасна варіативність цифрових ресурсів інтегрує нові моделі взаємовідносин у всій мережі ланцюга постачання, трансформуючи галузь логістики вантажних перевезень у напрямку децентралізації та оцифрування. Ці моделі залучають складні взаємопов'язані апаратні системи і потребують використання інноваційних технологій для забезпечення ефективності й безпеки обміну інформацією та фінансовими транзакціями.

Активне використання інформаційних систем у перевезеннях, у тому числі рефрижераторних контейнерів, дозволяє формувати диференційовані логістичні ринки вантажних перевезень на принципах фінансової прозорості, що сприяє розвитку мереж поставок. Актуальні моделі цифрового апгрейду логістичних систем потребує залучення технології блокчейн, яка надає підтримку одноранговому обміну, забезпечуючи відстеження та прозорість, незмінність даних, децентралізацію процесу логістики, зменшення помилок та просування концепції смарт-контрактів. Зазначене створюватиме максимально сприятливі умови для інвесторів в логістиці, підтримуючи відкритий

ринок, прозору митну та податкову системи, розвиток конкурентних переваг перевезень.

Галузь логістики вантажних перевезень, зокрема, рефрижераторних контейнерів, володіє важливою соціально-економічною наслідковістю та залишається затребуваною навіть в кризових умовах. Зважаючи на нові контексти цифровізації в сучасному глобалізованому суспільстві, перспективи широкого залучення потенціалу технологій блокчейн в досліджуваній сфері набувають особливої ваги, що актуалізує тему статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні впровадження передових багатофункціональних інформаційних систем у сферу перевезень рефрижераторних контейнерів знаходиться на етапі становлення. Водночас, дослідження потенціалу інформаційних технологій в логістичній сфері є одним із доволі «зрілих» векторів досліджень інформаційно-комунікаційних інновацій. Науковцями Е. Іраннежад [1], М. Пескера [2], І. Орджі та ін. [3] було розглянуто специфіку застосування технологій блокчейн у ланцюгах поставок та у транспортно-логістичному обслуговуванні, водночас, питання інтеграції блокчейн в перевезеннях рефрижераторних контейнерів залишилось відкритим. М. Іслам та ін. [4] аналізували ключові сфери використання інформаційних технологій у контейнерній логістиці: моніторинг вантажів, управління маршрутами та транспортними засобами, технології безпеки, мобільні рішення, аналітика та інтелектуальна автоматизація. На продовження, Л. Кох та ін. [5] запропонували оптимізувати систему відстеження вантажів за допомогою GPS/RFID-технологій, що забезпечують повну прозорість логістичного ланцюга, дозволяючи відстежувати місцезнаходження контейнерів та параметри їхнього стану в режимі реального часу.

Авторами Б. Керничний [6], О. Кудирко [7] особливу увагу приділили системам управління складом (WMS), котрі наділені функціоналом автоматизації процесів прийняття, зберігання та відвантаження контейнерів, оптимізуючи ресурсовикористання. Серед систем інтелектуальної автоматизації наукові пошуки вчених А. Літошенко [8], Х. Танг та ін. [9] виокремили потенціал великих даних (Big Data) та аналітичних систем, які акумулюють та аналізують величезні обсяги даних, з метою ідентифікації ключових тенденцій, загальної оптимізації процесів та достовірного прогнозування попиту. На продовження, П. Хело, Ю. Хао [10] актуалізували машинне навчання та штучний інтелект (AI) у досліджуваному контексті, як ефек-

тивний засіб для прогнозування затримок, оптимізації завантаження контейнерів та загального покращення управління перевезеннями.

Досліджуючи блокчейн як ефективну технологію безпеки та простежуваності, В. Моркунас та ін. [11], Л. Г'юз та ін. [12] переконують у їх здатності забезпечити високий рівень прозорості та незмінності даних у ланцюгу постачання, що вбачається особливо значущим для відстеження руху контейнерів та попередження ризиків шахрайства.

Сектор логістики перевезень рефрижераторних контейнерів потенційно володіє великою потребою у використанні цифрових інновацій, адже його функціонування охоплює різні регіони та організації, а ефективне управління інформаційними потоками відіграє детермінуючу роль для результативності роботи. Заповнення прогалин в науковому дискурсі, що пов'язані з критичними чинниками інтеграції технології блокчейн у сферу логістики вантажних перевезень дозволить створити ефективні стратегії підвищення конкурентоспроможності компаній. Зазначене потребує всебічного висвітлення ключових чинників впливу на процес інформаційного апгрейду галузі, як організаційно-технологічного, так і зовнішньоекономічного секторів логістики.

Постановка завдання. Метою дослідження є розширений аналіз потенціалу використання інформаційних систем у перевезеннях рефрижераторних контейнерів. Особлива увага приділена можливостям впровадження блокчейн, виокремленню основних переваг та супутніх ризиків.

Виклад основного матеріалу. Залучення інформаційно-комунікаційних систем до процесу перевезення рефрижераторних контейнерів передбачає автоматизацію систем логістики та управління з метою вдосконалення процесу транспортування, моніторингу умов перевезення, підвищення безпеки, інтеграції дистанційних систем контролю температури. Основні аспекти автоматизації передбачають автоматизацію процесів на терміналах, впровадження інтегрованих систем та алгоритмів відстеження [13].

Автоматизація дозволяє оптимізувати логістику та зменшити час доставки, знизити експлуатаційні витрати, точно контролювати стан вантажів, запобігати пошкодженням та мінімізувати ризики втрати вантажу, швидше реагувати на зміни ринку перевезень та, як наслідок, покращувати якість послуг. Основні сучасні напрямки застосування інформаційних технологій у логістиці вантажних перевезень узагальнено у таблиці 1.

Вектори застосування інформаційних технологій у логістиці вантажних перевезень

Напрямок інтеграції	Приклад інформаційної технології	Особливості впливу на процес логістики
Відстеження вантажів та моніторинг	GPS/RFID-технології	Дозволяють у режимі реального часу відстежувати місцезнаходження контейнерів та їхній стан (температуру, вологість), забезпечуючи повну прозорість логістичного ланцюга.
	Системи управління складом (WMS)	Автоматизують процеси прийняття, зберігання та відвантаження контейнерів на складах, оптимізуючи використання площі та робочої сили.
Управління транспортними засобами та маршрутами	TMS-системи	Допомагають планувати найоптимальніші маршрути доставки, управляти автопарком, оптимізувати витрати на паливо та підвищувати ефективність перевезень.
Інтелектуальна автоматизація та аналітика	Великі дані (Big Data) та аналітичні системи	Збирають та аналізують величезні обсяги даних для виявлення тенденцій, оптимізації процесів та прогнозування попиту.
	Штучний інтелект (AI) та машинне навчання	Використовуються для прогнозування затримок, оптимізації завантаження контейнерів та покращення прийняття рішень у реальному часі.
Технології безпеки та простежуваності	Блокчейн	Забезпечує високий рівень безпеки, прозорості та незмінності даних у ланцюгу постачання, що особливо важливо для відстеження руху контейнерів та запобігання шахрайству.
Мобільні рішення	Мобільні додатки та системи обслуговування	Надають доступ до інформації та функцій управління з будь-якої точки світу, що покращує комунікацію та швидкість реагування на зміни.

Джерело: розробка автора

Блокчейн можна розглядати як спільну цифрову книгу, котра підтримується групою вузлів та дає змогу формувати криптографічні алгоритми для гарантії стандартизованого аудиту, безпеки та цілісності даних. Блокчейн у контейнерній логістиці сприяє підвищенню прозорості системи відстеження вантажів, транзакцій та документообігу через створення незмінних, розподілених цифрових реєстрів [14]. Основними аспектами використання блокчейн вбачаються:

- децентралізація реєстру шляхом створення диференційованої бази даних, котра акумулює інформацію про всі етапи перевезення вантажу;
- прозорість: усі стейкхолдери мають доступ до однієї версії історії вантажу;
- незмінність даних: зміна статусу вантажу чи транзакція фіксується у новому «блоці», котрий криптографічно пов'язаний з попереднім блоком, що надає запису незмінності та захищеності від підроблення;
- формат смарт-контрактів: автоматичне виконання дій, що оптимізує фінансові процеси.

Загалом, феномен смарт-контракту являє собою протокол, що контролює цифрові активи та визначає права та обов'язки учасників, мінімізуючи вплив третіх сторін та супутні ризики. Також, технологія блокчейн підтримує процедуру

незмінності інформації у процесі ланцюга поставок та керують фінансовим потоком.

Процес перевірки в блокчейн може реалізовуватись або через дозволений доступ авторизованих користувачів у приватних блокчейн-платформах (наприклад, Hyperledger чи Ethereum), або реалізованим неавторизованими користувачами у загальнодоступних платформах [7]. Публічні блокчейн-платформи допомагають компаніям заощаджувати ресурси, тоді як приватні дозволяють виключити традиційних посередників (зокрема, банки) під час ділових операцій, гарантуючи більшу конфіденційність транзакцій.

Блокчейн інтенсифікує передачу інформаційних потоків між стейкхолдерами, зменшуючи логістичні витрати, скорочуючи час доставки, покращуючи управління запасами. Вирішення бізнес-проблем, включаючи сферу фінансових операцій, за допомогою таких властивостей блокчейн, як надійність та цілісність даних, децентралізація та прозорість, забезпечується постійними записами транзакцій, що групуються в окремі блоки і не можуть бути підроблені [10]. Також, блокчейн позитивно впливає на досягнення цілей управління ланцюгом поставок: якість, вартість, швидкість, стійкість, надійність, гнучкість.

Технологія дозволяє вантажним логістичним компаніям відстежувати матеріальні потоки в режимі реального часу, оптимізуючи процес транспортування та підвищуючи точність управління ризиками. Особливою перспективною значущістю в даному контексті наділене поєднання Інтернету речей (IoT) та блокчейну, адже датчики IoT акумулюють дані, що можна легко відстежувати через певні проміжки часу [3].

Рішення щодо інтеграції технологічних інновацій у логістичні системи ґрунтується наділене організаційним, технологічним та зовнішнім інституційним контекстом. TOI (Total Outstanding Information) блокчейн розглядається як концепція використання технології блокчейн для забезпечення єдиного, прозорого та незмінного запису всієї інформації, що стосується логістичних процесів у ланцюжку поставок та дає змогу відстежувати товари, оптимізувати транспортні процеси, автоматизувати фінансові операції, підвищувати безпеку та довіру між усіма учасниками ланцюга поставок [14]. Основні чинники, які визначають ефективність процесу впровадження та використання інформаційних систем у перевезеннях рефрижераторних контейнерів, приведені на рис. 1.

Технологічні	Організаційні	Інституційні
- Інфраструктурне забезпечення - Складність інтеграції - Легкість випробування та моніторингу - Сумісність - Безпека та конфіденційність	- Наявність навчальної бази - Підтримка вищого керівництва - Розмір компанії - Потенціал людських ресурсів - Інвестиційний клімат - Організаційна культура	- Державна підтримка - Конкурентний тиск - Інституційна довіра - Динаміка ринку - Тиск стейкхолдерів

Рис. 1. Основні чинники ефективності інтеграції інформаційних систем та блокчейн у сферу перевезень рефрижераторних контейнерів

Джерело: узагальнено автором

Аналізуючи рис. 1, варто відзначити, що сприятливими передумовами для інтеграції інформаційних систем та, зокрема, блокчейн у перевезеннях рефрижераторних контейнерів позиціонуються: наявність інфраструктурного забезпечення (мережі транспортних маршрутів, центри доставки, об'єкти завантаження/розвантаження, програмні аспекти з управління та контролю руху тощо), легкість випробування та моніторингу, сумісність (інтегрованість технологій блокчейн до відповідних логістичних платформ).

Серед організаційних передумов варто відзначити ресурсне наповнення галузі логістики, що включає наявність фахових навчальних закладів та програм кваліфікації для працівників, з метою адаптацію технологій блокчейну у сферу вантажних перевезень. Також, важливою є підтримка вищого керівництва щодо забезпечення напрямків та ресурсів як під час, так і після інтеграції блокчейну в логістичні процеси.

Впливовим чинником на ефективність також є розмір компанії, кількість співробітників та обсяг виробництва, адже великі бізнес-формації володіють ширшим доступом до ресурсів, необхідних для вдосконалення бізнес-стратегії з метою підвищення конкурентоспроможності. Натомість невеликі компанії, зазвичай, неохоче інтегрують інноваційні рішення у бізнес-операціях та вагаються щодо організації навчання працівників через передбачувані ризики.

Ще одним чинником ефективності інтеграції інформаційних систем у систему вантажних перевезень є організаційна культура, яка передбачає: усталені моделі поведінки та практики, а також потенціал людських ресурсів, що впливають на характер реагування на зовнішній тиск і прийняття стратегічних бізнес-рішень. Окрім того, значний вплив у цьому контексті належить прогнозованій вартості інвестицій, яка передбачає наявність фінансування під час розробки та впровадження блокчейн-інструментів.

Інституційний контекст використання інформаційних систем у перевезеннях рефрижераторних контейнерів передбачає фактори, які асимілюють різні сфери діяльності бізнесу, зокрема, інституційну довіру та державну політику, конкурентний тиск, вплив стейкхолдерів, турбулентність ринку. Конкурентний тиск, пов'язаний із зовнішнім середовищем галузі логістики в епоху глобалізації торгівлі, інвестицій та аутсорсингу спонукає бізнес до пошуку шляхів формування додаткових конкурентних переваг.

Тиск стейкхолдерів, до того ж деталізує високі та постійні вимоги учасників процесу або інвесторів. Водночас урядова підтримка передбачає спроможність відповідних державних установ надавати практичну допомогу для заохочення впровадження цифрових інновацій у сферу логістики.

Інституційна довіра позиціонується ще одним критичним чинником у досліджуваному контексті, який детермінує прийнятність технологій зовнішнім середовищем галузі логістики вантажних перевезень. Рівень довіри репрезентує впевненість клієнтів у прозорості, надійності та безпеці

діяльності компанії, що сприяє прийняттю інформаційних систем, зокрема, блокчейн, у щоденну практику.

Логістичним компаніям, що спеціалізуються на вантажних перевезеннях, у тому числі, рефрижераторних контейнерів, складно спрогнозувати динаміку ринкових тенденцій, що визначається гострою конкуренцією та стрімким техніко-технологічним прогресом. Ринкова турбулентність, яка зумовлює нестабільність та невизначеність логістичних послуг, може чинити суттєвий негативний вплив на інтеграцію цифрових інновацій, у тому числі, блокчейн.

Загалом, необхідно відзначити, що блокчейн став знахідкою для сучасної логістики, яка зазнає постійного ускладнення в кризових умовах глобального розвитку. За допомогою інноваційних можливостей цієї технології можна за мінімальних витрат захистити ланцюжок постачання від людського фактора та корупційних ризиків, виконувати транзакції без залучення третіх сторін, вибудувати систему електронного документообігу або проведення тендерів, створити надійну та повністю автономну систему розрахунків

між контрагентами, забезпечити всім учасникам логістичного ланцюжка прозорість операцій та відстеження вантажів.

Висновки. Опираючись на теоретичному підґрунті TOI, у межах статті запропоновано новий концептуальний підхід до вдосконалення системи перевезень рефрижераторних контейнерів на основі застосування технологій блокчейн. Підхід передбачає виокремлення ключових чинників впливу на ефективність цифрового апгрейду логістики вантажних перевезень у технологічному, організаційному та інституційному аспектах. Для подальшого розвитку це дозволить краще зрозуміти сутність інтеграції блокчейн, усвідомити критичність впливу окремих факторів в контексті сприяння чи унеможливлення апгрейду, та превентивно вирішити проблеми, пов'язані з його впровадженням на рівні логістичної компанії.

Перспективи майбутніх досліджень вбачаються у розробці практичних кейсів застосування блокчейн в організаційному процесі, для цифровізації логістичних операцій у контексті забезпечення прозорості та підвищення конкурентоспроможності компаній.

Список літератури:

1. Irannezhad E. Is blockchain a solution for logistics and freight transportation problems? *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 48. Pp. 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.023>
2. Pesquera M. A. Automation in logistics port and freight transport with blockchain technology. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 78. Pp. 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.050>
3. Orji I. J., Kusi-Sarpong S., Huang S., Vazquez-Brust D. Evaluating the factors that influence blockchain adoption in the freight logistics industry. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2020. Vol. 141. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102025>
4. Islam M. A., Hasan M. A. R., Zaman S., Haque S. Revolutionizing Supply Chain, Logistics, Shipping, And Freight Forwarding Operations with Machine Learning And Blockchain. *American Journal of Scholarly Research and Innovation*. 2023. Vol. 2(01). Pp. 79–103. <https://doi.org/10.63125/0jnkvk31>
5. Koh L., Dolgui A., Sarkis J. Blockchain in transport and logistics—paradigms and transitions. *International Journal of Production Research*. 2020. Vol. 58(7). Pp. 2054–2062. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1736428>
6. Керничний Б. Зарубіжний та вітчизняний досвід застосування технології блокчейн в транспортно-логістичному обслуговуванні. *Соціально-економічні проблеми і держава*. 2020. No 2 (23). С. 46–56.
7. Кудирко О. В. Інновації в логістиці: перспективи використання технології блокчейн у ланцюгах поста-вок. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія «Міжнародні економічні відносини»*. 2017. No 15. С. 158–163.
8. Літошенко А. В. Технологія blockchain: переваги та неочевидні можливості використання у різних галузях. *Економіка та держава*. 2017. No 8. С. 77–78.
9. Tang H., Shi Y., Dong P. Public blockchain evaluation using entropy and TOPSIS. *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 117. P. 204–210.
10. Helo P., Hao Y. Blockchains in operations and supply chains: A model and reference implementation. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 136. P. 242–251.
11. Morkunas V. J., Paschen J., Boon E. How blockchain technologies impact your business model. *Business Horizons*. 2019. Vol. 62, no. 3. P. 295–306.
12. Hughes L., Dwivedi Y. K., Misra S. K. Blockchain research, practice and policy: Applications, benefits, limitations, emerging research themes and research agenda. *International Journal of Information Management*. 2019. Vol. 49. P. 114–129.

13. Dobrovnik M., Herold D., Fürst E. Blockchain for and in Logistics: What to Adopt and Where to Start. *Logistics*. 2018. Vol. 2, no. 3. P. 18.

14. Колінець Л. Б., Гомотюк А. О. Цифрове залучення капіталу: можливості, виклики та глобальні тенденції. *Серія: Економіка*. 2023. № 26. С. 5–13. <https://doi.org/10.34079/2226-2822-2023-13-26-5-13>

Volokhov O.O. USE OF INFORMATION SYSTEMS IN REFRIGERATED CONTAINER TRANSPORTATION: FROM RFID TO BLOCKCHAIN

In today's conditions of increasing global economic interdependence, the efficiency and transparency of international logistics operations, especially in the field of transportation of perishable goods, are becoming critically important. Trends in global digitalization of all spheres of social life lead to the formation of new models of relationships within the supply chain network. Integration of information and communication systems in the transportation of refrigerated containers allows automating management and logistics systems in order to optimize the transportation process and track transportation conditions, assimilation with temperature control systems, and guarantee their safety. The purpose of the study is an expanded analysis of the potential of using information systems in the transportation of refrigerated containers. The article considers the key advantages of transportation automation, in particular; increasing efficiency, reducing costs, optimizing the security environment, and creating competitive advantages. The key areas of use of information systems in container logistics are summarized. The possibilities of blockchain technology in the transportation of refrigerated containers are analyzed in the context of increasing transparency, security, and efficiency of the process, tracking material flows in real time, minimizing the risks of errors and unfair actions, improving the document management system using smart contracts, and optimizing risk management. The TOI model (technological, organizational, institutional impact) was adapted as a methodological basis. The study highlights the factors influencing the implementation of blockchain technologies in technological, organizational and institutional aspects. The impact of the institutional environment of the firm (TOI) on the successful implementation of blockchain technologies in the field of refrigerated container transportation is noted. It is proven that the considered information structures are positioned as a promising basis for deeper research into the critical factors of blockchain technology integration in the field of freight logistics.

Key words: logistics, refrigerated container transportation, information systems, blockchain, supply chain, TOI factors.

Дата надходження статті: 06.11.2025

Дата прийняття статті: 25.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 656.615:629.563:519.876
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/36>

Волянський С.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Шумило О.М.

Одеський національний морський університет

Мельник О.М.

Одеський національний морський університет

Котенко О.В.

Одеський національний морський університет

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕХНІЧНИХ ВУЗЛАХ МОРСЬКИХ АВТОНОМНИХ ПЛАТФОРМ

У статті розроблено математичну модель деградації технічних вузлів морських автономних платформ (МАП), яка поєднує детерміновані та стохастичні процеси для адекватного відтворення змін працездатності системи в умовах впливу морського середовища. Запропоновано індекс критичності вузла, який забезпечує кількісну оцінку його впливу на інтегральну ефективність функціонування МАП та дозволяє здійснювати ранжування компонентів за рівнем важливості. На основі отриманих значень розроблено інтегральну функцію ефективності, яка описує поступове зниження працездатності платформи з урахуванням вагових коефіцієнтів важливості окремих вузлів. Проведено порівняльний аналіз трьох типів моделей деградації – лінійної, експоненційної та стохастичної (модель Вінера). Результати моделювання показали, що стохастичний підхід найточніше відображає реальні флуктуації параметрів у динамічних умовах експлуатації. Визначено критичний поріг функції ефективності, який може бути використаний як кількісний критерій переходу системи у граничний стан та основа для обчислення прогнозованого залишкового ресурсу (RUL). Отримані результати формують теоретичну і практичну основу для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (DSS) у сфері технічної експлуатації морських автономних платформ. Додатково обґрунтовано можливість застосування моделі для розробки алгоритмів самодіагностики й стратегій технічного обслуговування з урахуванням поточного стану системи. Запропоновані підходи можуть бути інтегровані в інтелектуальні системи для прогнозного управління технічним ресурсом у реальному часі. Подальші дослідження передбачають інтеграцію моделі у польові випробування з метою оцінки її ефективності в реальних умовах експлуатації, де особливу увагу також буде приділено впливу змін середовища на надійність критичних компонентів системи.

Ключові слова: морські автономні платформи, деградаційні процеси, індекс критичності, інтегральна функція ефективності, залишковий ресурс (RUL), стохастичне моделювання, цифровий двійник, інтелектуальні системи підтримки рішень, технічна діагностика, операційна надійність, морський транспорт, безпека операцій, надійність.

Постановка проблеми. В системі експлуатації морських автономних платформ (МАП) забезпечення довготривалої надійності технічних вузлів є першочерговим завданням, оскільки відсутність постійного технічного обслуговування в морському середовищі значно підвищує ризик відмови функціональних вузлів. Деградаційними процесами є поступові, часто нелінійні зміни характеристик матеріалів, компонентів та під-

систем, які призводять до зниження ефективності роботи платформи в цілому.

В умовах тривалої автономності кожна підсистема (енергетична, навігаційна чи комунікаційна) піддається впливу таких факторів, як корозія, температурні коливання, вібраційні навантаження, втома матеріалу, тому врахування деградації у моделях надійності є необхідним для прогнозування часу безвідмовної

роботи (MTBF), формування та планування стратегії місії.

Класичні підходи до оцінки надійності (наприклад, моделі експоненційного старіння) недостатньо відображають реальні фізичні механізми деградації, особливо при наявності стохастичних чинників, що створює потребу в гібридних моделях, що поєднують аналітичні функції деградації, машинне навчання та симуляційні сценарії. Питання моделювання деградаційних процесів технічних систем активно досліджується протягом останніх двох десятиліть, особливо у сфері авіаційної, енергетичної та морської техніки. Ключовою проблемою є пошук адекватної математичної моделі, яка б відображала як фізичну природу зносу, так і стохастичний характер змін параметрів в умовах реальної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій відображає науково обґрунтовану еволюцію підходів до моделювання деградаційних процесів у технічних вузлах морських автономних платформ, охоплюючи як теоретичні, так і прикладні аспекти динаміки надійності, ризику та керування життєвим циклом. У роботах [1-3] сформовано методологічні основи контролю та онлайн-моделювання ризику автономних морських систем (AMS), що забезпечує перехід від статичних до адаптивних моделей оцінки деградації технічних компонентів під впливом змінних факторів середовища. Праці [4-6] спрямовані на використання машинного навчання, глибинного підкріплювального навчання та сенсорних мереж для прогнозування відмов і визначення функціональної надійності в умовах невизначеності та збурень середовища. Джерела [7-9] демонструють практичне застосування штучного інтелекту у навігаційних і планувальних задачах автономних суден, де ризик і деградація систем враховуються в реальному часі через адаптивні системи винагород і оптимізації траєкторій. Робота [10] розширює ці підходи, показуючи ефективність гібридного навчання при високоточному позиціонуванні, що може бути аналогічно використано для калібрування деградаційних моделей морських вузлів. У дослідженнях [11-13] простежується міжгалузевий зв'язок, застосування робототехнічних, когнітивних та модульних технологій у технічному обслуговуванні та автономній координації, що формує основи для крос-індустріального перенесення алгоритмів діагностики й оцінки зношення. Робота [14] забезпечує екологічний і енергетичний контекст, де підвищення ефективності суден тісно пов'язане зі сповільненням деграда-

ції систем і оптимізацією режимів експлуатації. Нарешті, праці [15-18] розкривають український науковий внесок у структурний аналіз, оцінку технічного стану корпусних елементів, вплив навігаційних та експлуатаційних чинників на довговічність і стійкість конструкцій. Сукупно ці джерела формують цілісну методологію, у якій деградація розглядається як динамічний процес у контексті експлуатаційної адаптації, а її моделювання спирається на поєднання сенсорних даних, машинного навчання, стохастичних методів і багаторівневого управління технічним станом автономних морських платформ.

Постановка завдання. Проведений аналіз наукових джерел свідчить, що попри значну кількість підходів до опису деградаційних процесів, відсутня універсальна модель, яка б комплексно враховувала стохастичний характер зносу компонентів у морських умовах та взаємозалежність деградації окремих вузлів і зниження загальної ефективності платформи. Окремо цікавлять обмеження, пов'язані з автономністю та неможливістю регулярного технічного обслуговування.

Актуальні підходи здебільшого орієнтовані на моделювання зносу окремих компонентів, таких як акумулятори, насоси чи сенсори однак не враховують їхнього впливу на загальний рівень системної надійності. Це призводить до невідповідності між прогнозованим технічним станом окремих елементів та комплексною оцінкою готовності платформи до виконання завдань. Відтак, виникає науково-прикладна проблема яка полягає в створенні моделі, що дозволяє кількісно описати вплив деградаційних процесів у вузлах МАП на інтегральну ефективність функціонування системи з урахуванням критичності компонентів.

У межах даного дослідження сформульовано мету яка полягає в розробленні математичної моделі деградаційних процесів у технічних компонентах морських автономних платформ, яка здатна забезпечити оцінку динаміки зміни ефективності системи в часі та прогнозування критичних моментів втрати функціональності. Особливу увагу приділено процесу інтеграції стохастичних параметрів морського середовища, який дозволяє враховувати випадкові зовнішні впливи, характерні для реальних умов експлуатації. Запропонований підхід може бути основою для побудови систем підтримки прийняття рішень (DSS), орієнтованих на адаптивне планування місії з можливістю технічного обслуговування автономних платформ.

Для реалізації поставленої мети передбачено вирішення комплексу завдань: від класифікації

вузлів за критичністю до створення математичного апарату, який описує деградацію із врахуванням випадкових збурень. Дослідження охоплює аналіз існуючих підходів (детермінованих, стохастичних, гібридних), формалізацію динаміки зниження працездатності, побудову симуляційних сценаріїв та оцінку впливу деградації на інтегральний індекс ефективності.

Виклад основного матеріалу.

Класифікація технічних вузлів за критичністю

Оцінка критичності технічних вузлів є ключовим етапом при побудові математичної моделі деградації морської автономної платформи (МАП). Оскільки система складається з великої кількості підсистем з різним рівнем впливу на працездатність, необхідно визначити відносну важливість кожного вузла в контексті загальної ефективності. Отже критичність вузла характеризує його внесок у функціонування платформи та визначає, наскільки деградація даного вузла впливає на зниження інтегрального індексу ефективності $IEE(t)$.

Методологія визначення критичності

Для кожного технічного вузла i вводиться індекс критичності CI_i , який обчислюється за узагальненою формулою:

$$CI_i = \alpha_1 R_i + \alpha_2 S_i + \alpha_3 E_i + \alpha_4 M_i, \quad (1)$$

де: R_i – коефіцієнт надійності вузла (mean time between failures, MTBF); S_i – коефіцієнт структурної важливості у функціональній схемі системи; E_i – коефіцієнт енергетичного впливу (споживання чи генерація енергії); M_i – коефіцієнт впливу на місію (mission importance); $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – вагові коефіцієнти ($\sum \alpha_i = 1$), що задаються експертно на основі аналізу функцій системи.

Отже, $CI_i \in [0, 1]$, де: $CI_i \approx 1$ – вузол критично важливий для функціонування;

$CI_i \approx 0$ – вузол має незначний вплив на працездатність платформи.

Таким чином кількісного аналізу структурної стійкості морських автономних платформ (МАП) введено показник критичності вузла CI_i , який характеризує ступінь впливу окремого компонента на загальну функціональну працездатність системи. Таке формалізоване представлення дає змогу оцінювати уразливість системи та прогнозувати наслідки деградації компонентів у часі.

На основі функціонального аналізу було виділено шість базових категорій вузлів МАП, наведені у таблиці 1. Отримана класифікація може бути основою для побудови матриці ризику щодо вразливості системи та подальшого сценарного моделювання стійкості автономних платформ при часткових відмовах або втраті функцій.

Вузли з показником $CI_i > 0.8$ належать до критичної групи, оскільки безпосередньо визначають здатність системи до автономного функціонування. Вони потребують підвищеного рівня моніторингу та дублювання ключових сенсорів і каналів живлення. Елементи з $CI_i \in [0.6; 0.8]$ класифікуються високим ступенем ризику, адже їх деградація може спричинити непрямий збій, наприклад, зниження точності в процесі навігації або втрату стійкості каналу зв'язку. Вузли з $CI_i < 0.6$ формують резервну підсистему та підлягають періодичному контролю відповідно до регламенту технічного обслуговування.

Як видно з таблиці 1, енергетичні та силові вузли мають найвищі показники критичності $CI > 0.85$, що пояснюється тим, що відмова таких компонентів безпосередньо призводить до втрати автономності або здатності платформи до руху. Навігаційний модуль також має високий рівень важливості, оскільки забезпечує стабілізацію та орієнтацію у просторі, натомість кому-

Таблиця 1

Класифікація типових вузлів морських автономних платформ

№	Категорія вузла	Основна функція	Приклади	Основні механізми деградації	CI_i
1	Енергетичний блок	Генерація і зберігання енергії	Акумулятор, блок живлення	Корозія контактів, зниження ємності, старіння електроліту	0.90
2	Навігаційний модуль	Орієнтація за курсом та стабілізація руху	Гіроскоп, IMU, GPS	Дрейф сенсорів, втрати калібрування, термічний дрейф	0.85
3	Комунікаційний вузол	Передача та прийом даних	Анени, модеми, передавачі	Окислення, розбалансування резонансних частот	0.70
4	Силовий модуль	Рух та керування рухом	Електродвигун, редуктор, гвинт	Втома підшипників, перегрів, кавітація	0.88
5	Діагностичний блок	Моніторинг стану системи	Сенсорні мережі, контролери	Відмова сенсорів, шум сигналу, деградація електроніки	0.65
6	Структура корпусу	Захист і герметизація	Обшивка корпусу, ущільнення набору	Корозія, мікротріщини, гідродинамічна ерозія	0.60

нікаційні та діагностичні вузли мають менший вплив на безпосередню працездатність, проте їх деградація також обмежує можливість контролю за станом та зв'язку, що опосередковано впливає на загальну ефективність системи.

Для наочності залежність критичності вузлів можна подати у вигляді діаграми (рис. 1).

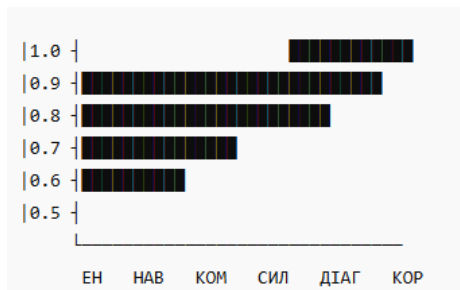


Рис. 1. Індекс критичності як функція категорії вузлів

(Умовне позначення: ЕН – енергетичний, НАВ – навігаційний, КОМ – комунікаційний, СИЛ – силовий, ДІАГ – діагностичний, КОР – корпус)

Як показано на графіку, три основні категорії – енергетичний, навігаційний та силовий модулі утворюють ядро критично важливих компонентів, що визначають тривалість і ефективність виконання місії. Запровадження індексу критичності (CI_i) дає змогу кількісно оцінити вплив кожного вузла на загальну працездатність МАП.

Зрозуміло, що найвищу чутливість до деградаційних процесів демонструють енергетичні та силові елементи, відмова яких безпосередньо впливає на втрату автономності системи. Розраховані значення CI_i можуть бути використані для побудови інтегральної моделі ефективності $IEE(t)$ та формування симуляційних сценаріїв з урахуванням процесів деградації.

Модельовання деградаційних процесів

Для адекватного опису довготривалого функціонування МАП необхідно сформулювати математичну модель, яка відображає зміну технічних характеристик вузлів у часі під впливом фізико-хімічних та механічних процесів.

Кожен вузол платформи розглядається як елементарна підсистема з певною функціональною ефективністю $P_i(t)$, яка деградує з часом через накопичення пошкоджень, зношування або старіння матеріалів. Основна ідея полягає в тому, що деградація є необоротним процесом, який зменшує корисну працездатність вузла та, відповідно, знижує інтегральну ефективність системи.

Деградація вузла i описується неперервною, зростаючою функцією часу $Di(t)$, що задовольняє умови:

$$D_i(0) = 0, \quad D_i(t) \in [0, 1), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} D_i(t) = 1. \quad (2)$$

Тобто $Di(t) = 0$ означає повну справність, а $Di(t) \rightarrow 1$ – повну відмову.

Для різних типів вузлів функція може мати різну форму. Найпоширенішими є три підходи а саме лінійна модель деградації:

$$D_i(t) = k_i \cdot t, \quad 0 \leq D_i(t) < 1, \quad (3)$$

де k_i – коефіцієнт швидкості деградації.

Такий підхід застосовується до компонентів із майже рівномірним зносом (наприклад, редуктори, корпусні елементи).

Експоненційна модель, яка здебільшого використовується для електронних модулів, акумуляторів, сенсорів:

$$D_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}, \quad (4)$$

де λ_i – параметр інтенсивності старіння.

Стохастична модель (процес Вінера / гамма-процес), яка придатна для компонентів, чутливих до випадкових навантажень або температурних коливань:

$$D_i(t) = \mu_i t + \sigma_i W(t), \quad (5)$$

де $W(t)$ – стандартний процес Вінера, μ_i – середня швидкість деградації, σ_i – дисперсія випадкових флуктуацій.

Втрата працездатності безпосередньо впливає на технічну ефективність вузла.

Нехай P_{i0} – початкова (номінальна) ефективність. Тоді у момент часу t :

$$P_i(t) = P_{i0} \cdot (1 - D_i(t)). \quad (6)$$

Таким чином, ефективність зменшується пропорційно рівню деградації.

Враховуючи стохастичний характер процесу, можна ввести очікуване значення ефективності:

$$E[P_i(t)] = P_{i0} \cdot (1 - E[D_i(t)]). \quad (7)$$

Інтегральна ефективність платформи

Загальний рівень ефективності морської автономної платформи визначається як сума зважених ефективностей роботи усіх вузлів, скоригованих на ступінь їх деградації:

$$IEE(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot P_i(t) \cdot (1 - D_i(t)), \quad (8)$$

де ω_i – ваговий коефіцієнт важливості вузла (відповідає індексу критичності CI_i); n – кількість вузлів у системі.

Підставивши $P_i(t) = P_{i0} (1 - D_i(t))$, отримаємо:

$$IEE(t) = P_{i0} \sum_{i=1}^n \omega_i (1 - D_i(t))^2. \quad (9)$$

Такий вираз є базовим для подальшого чисельного моделювання.

Критичний рівень ефективності

Визначимо порогове значення ефективності IEE_{cr} , при якому вважається, що платформа втрачає функціональну здатність виконувати місію:

$$IEE(t_{cr}) = IEE_{cr}, \quad (10)$$

де t_{cr} – момент критичного стану. Зазвичай IEE_{cr} приймають у межах 0.6-0.7 від номінального рівня $IEE(0)$. Час t_{cr} відповідає прогнозованому залишковому ресурсу (RUL) системи.

Для аналітичного сценарію розглянемо приклад для трьох вузлів з такими параметрами.

Таблиця 2

Параметри технічних вузлів

Вузол	P_{i0}	ω_i	Модель деградації	Параметри
Енергетичний блок	1.0	0.4	Експоненційна	$\lambda = 0.15$
Силовий модуль	0.8	0.35	Стохастична (Вінера)	$\mu = 0.1$, $\sigma = 0.05$
Комунікаційний вузол	0.6	0.25	Лінійна	$k = 0.02$

Підставимо у формулу для $IEE(t)$:

$$IEE(t) = 0.4(1 - e^{-0.15t})^2 + 0.35(1 - (0.1 + 0.05W(t)))^2 + 0.25(1 - 0.02t)^2.$$

Для очікуваного значення (без шуму) отримаємо:

$$E[IEE(t)] = 0.4(1 - e^{-0.15t})^2 + 0.35(1 - 0.1t)^2 + 0.25(1 - 0.02t)^2.$$

Графік на рисунку 2 показує плавне зниження ефективності системи, причому енергетичний блок домінує у швидкості деградації.

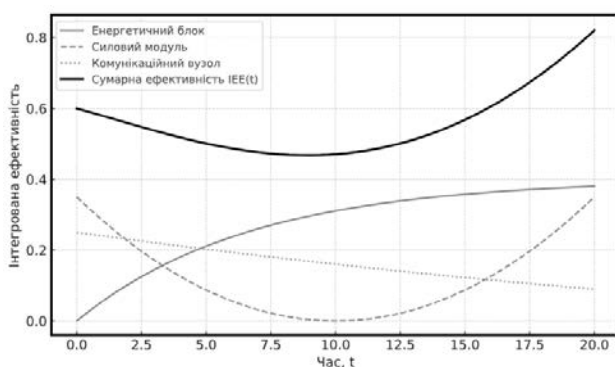


Рис. 2. Динаміка деградації інтегрованої ефективності системи $IEE(t)$ для трьох підсистем

Для подальших чисельних експериментів модель може бути представлена у вигляді диференціального рівняння деградації:

$$\frac{dD_i(t)}{dt} = f_i(D_i, t) + \xi_i(t), \quad (11)$$

де $f_i(D_i, t)$ – детермінована складова (наприклад, експоненційна), а $\xi_i(t)$ – стохастичний збурюючий термін, який описує вплив зовнішніх чинників (температури, вібрації, корозії).

Таким чином розроблена математична модель забезпечує кількісне представлення деградації вузлів у часі, яка дозволяє інтегрувати аналітичні та стохастичні компоненти, враховуючи як детермінований знос, так і випадкові флуктуації. Така модель придатна для оцінки залишкового ресурсу системи, побудови сценаріїв симуляційного моделювання та розрахунку часу досягнення критичного рівня ефективності IEE_{cr} . Отримані співвідношення є базою для побудови сценаріїв деградації та аналізу результатів моделювання.

Отримані результати підтверджують, що деградація технічних вузлів морських автономних платформ (МАП) має багатокомпонентний і стохастичний характер, який не може бути адекватно описаний класичними моделями експоненційного старіння. Введення індексу критичності дозволило здійснити кількісну оцінку внеску кожного вузла у загальну працездатність системи, що забезпечує більш точне ранжування за впливом на функціональну ефективність.

Аналіз показав, що найвищу чутливість до деградаційних процесів мають енергетичні та силові модулі, і саме ці компоненти визначають межі автономності платформи. Порівняння трьох типів моделей (лінійної, експоненційної та стохастичної) показало, що стохастичний підхід на основі процесу Вінера найкраще відображає реальні флуктуації деградації у морських умовах. Це узгоджується з сучасними дослідженнями [1-6], де подібні підходи застосовуються для прогнозування довговічності автономних підводних і надводних систем. Таким чином, запропонована модель забезпечує можливість не лише аналізу поточного стану системи, але й прогнозування залишкового ресурсу (RUL), що є ключовим для планування технічного обслуговування та управління місіями в автономному режимі.

Висновки. У статті розроблено математичну модель деградації технічних вузлів морських автономних платформ, що поєднує детерміновані та стохастичні процеси для адекватного опису динаміки їх працездатності в умовах морського середовища. Запроваджено індекс критичності вузла, який забезпечує кількісну оцінку впливу кожного компонента на інтегральну ефективність системи та дає змогу ранжувати вузли за рівнем їх важливості. Побудовано інтегральну функцію ефективності, яка описує поступове зниження працездатності системи з ура-

хуванням вагових коефіцієнтів критичності вузлів. Показано, що критичний поріг функції ефективності може бути використаний як кількісний критерій переходу системи у граничний стан, що дозволяє визначати прогнозований залишковий ресурс

(RUL). Отримані результати формують методологічну основу для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (DSS) щодо прогнозування технічного стану морських автономних платформ у режимі реального часу.

Список літератури:

1. Wanderlingh F., Simetti E., Indiveri G. Marine Robot Control. *Encyclopedia of Systems and Control Engineering*. 2025. P. 262–273. DOI: 10.1016/B978-0-443-14081-5.00149-5
2. Yang R., Bremnes J.E., Utne I.B. Online risk modeling of autonomous marine systems: Case study of autonomous operations under sea ice. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 281. Article 114765. DOI:10.1016/j.oceaneng.2023.114765
3. Yang R., Utne I.B. Towards an online risk model for autonomous marine systems (AMS). *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 251. Article 111100. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.111100
4. Sulkowski B., Collette M. A comparison of machine learning classifiers in predicting safety for a multi-component dynamic system representation of an autonomous vessel. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 154. Article 104368. DOI:10.1016/j.apor.2024.104368
5. Huang M., Li X., Li Z., Zhang D., Chen Y. Uncertainty-aware deep distributed reinforcement learning for autonomous navigation of unmanned surface vehicles in complex environments. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 342. Article 122899. DOI:10.1016/j.oceaneng.2025.122899
6. Kumar M., Rattan N., Mondal S. Sensor systems for autonomous vehicles: Functionality and reliability challenges in adverse environmental conditions. *Measurement*. 2026. Vol. 258. Article 119215. DOI:10.1016/j.measurement.2025.119215
7. Christensen K.A., Gusev A., Tufte A.G., Alsos O.A., Steinert M. AI Captain: Conversational mission planning and execution system for autonomous surface vehicles. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 338. Article 121988. DOI:10.1016/j.oceaneng.2025.121988
8. Chu S., Lin M., Li D., Lin R., Xiao S. Adaptive reward shaping based reinforcement learning for docking control of autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 318. Article 120139. DOI:10.1016/j.oceaneng.2024.120139
9. Chen X., Bose N., Brito M., Khan F., Millar G., Bulger C., Zou T. Risk-based path planning for autonomous underwater vehicles in an oil spill environment. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 266. Article 113077. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.113077
10. Khalil S., Wang Z., Aouf N. Hybrid deep learning based monocular pose estimation for autonomous space docking operations. *Acta Astronautica*. 2025. Vol. 238. P. 612–629. DOI:10.1016/j.actaastro.2025.10.010
11. Liu X., Xie S. Innovative strategy and practice of using underwater robot for marine cable inspection and operation and maintenance. *Cognitive Robotics*. 2024. Vol. 5. P. 226–239. DOI:10.1016/j.cogr.2025.06.001
12. Gomola A., Bouwer Utne I. A novel STPA approach to software safety and security in autonomous maritime systems. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No. 10. Article e31483. DOI:10.1016/j.heliyon.2024.e31483
13. Abdulai S.F., Zayed T., Wuni I.Y., Antwi-Afari M.F., Yussif A. Cross-industry review of autonomous alignment technologies: Adaptation potential for modular construction. *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 495. Article 145101. DOI:10.1016/j.jclepro.2025.145101
14. Sardar A., Islam R., Anantharaman M., Garaniya V. Advancements and obstacles in improving the energy efficiency of maritime vessels: A systematic review. *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 214. Article 117688. DOI:10.1016/j.marpolbul.2025.117688
15. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Shibaev O., Volyanskaya Y. A comprehensive approach to structural integrity analysis and maintenance strategy for ship's hull. *Journal of Maritime Research*. 2024. Vol. 21. No. 1. P. 36–44.
16. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. Modelling of changes in ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargo. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol. 6. No. 2. P. 66–70. DOI:10.15587/2706-5448.2020.221653
17. Melnyk O., Kuznichenko S., Onishchenko O. Impact of AIS manipulation on shipping safety and strategic countermeasures. *Lex Portus*. 2024. Vol. 10. No. 4. P. 31–39. DOI:10.62821/lp10403
18. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Koskina Y., Lohinov O., Veretennik O., Stukalenko O. Fundamental concepts of deck cargo handling and transportation safety. *European Transport – Trasporti Europei*. 2024. No. 98. DOI:10.48295/ET.2024.98.1

Volynskyy S.M., Shumylo O.M., Melnyk O.M., Kotenko O.V. MODELING DEGRADATION PROCESSES IN TECHNICAL NODES OF MARITIME AUTONOMOUS PLATFORMS

The article develops a mathematical model of degradation of technical nodes of marine autonomous platforms (MAP), which combines deterministic and stochastic processes for adequate reproduction of changes in system performance under the influence of the marine environment. A node criticality index is proposed, which provides a quantitative assessment of its impact on the integral efficiency of MAP functioning and allows components to be ranked according to their level of importance. Based on the obtained values, an integral efficiency function has been developed, which describes the gradual decrease in platform performance, taking into account the weight coefficients of the importance of individual components. A comparative analysis of three types of degradation models has been carried out: linear, exponential, and stochastic (Wiener model). The simulation results showed that the stochastic approach most accurately reflects the real fluctuations of parameters in dynamic operating conditions. The critical threshold of the efficiency function was determined, which can be used as a quantitative criterion for the transition of the system to a limit state and as a basis for calculating the predicted remaining useful life (RUL). The results obtained form the theoretical and practical basis for the creation of intelligent decision support systems (DSS) in the field of technical operation of offshore autonomous platforms. Additionally, the possibility of using the model to develop self-diagnostic algorithms and maintenance strategies taking into account the current state of the system is substantiated. The proposed approaches can be integrated into intelligent systems for predictive real-time technical resource management. Further research involves integrating the model into field tests to assess its effectiveness in real operating conditions, where special attention will also be paid to the impact of environmental changes on the reliability of critical system components.

Key words: *marine autonomous platforms, degradation processes, criticality index, integral efficiency function, remaining useful life (RUL), stochastic modeling, digital twin, intelligent decision support systems, technical diagnostics, operational reliability, marine transport, operational safety, reliability.*

Дата надходження статті: 05.11.2025

Дата прийняття статті: 24.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Ienina I.I.

Ukrainian State Flight Academy

Chornogor N.O.

Ukrainian State Flight Academy

Matsui A.M.

Central Ukrainian National Technical University

APPLICATION OF INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEMS AND AI FOR AVIATION EQUIPMENT LIFECYCLE MANAGEMENT

This article examines approaches to the application of information-analytical systems and artificial intelligence technologies aimed at enhancing the efficiency of aviation equipment lifecycle management. The authors emphasize that the modern aviation industry faces the challenge of the exponential growth of data volumes generated at all stages of the lifecycle, from design to operation. Traditional analysis systems are deemed insufficient for making effective operational and strategic decisions, necessitating the implementation of an integrated management support environment.

The relevance of the study is substantiated by the need to develop comprehensive approaches capable of integrating modern IAS and AI into a unified architecture for aviation equipment LC management. The conducted analysis of recent research confirms that the integration of AI-analytics, big data, IoT-sensorics, and the digital twin concept is a global trend. The authors state that there is a deficit of studies that comprehensively examine the methods for integrating these technologies into the AE LC management system as a holistic process. The goal of the study is to justify approaches to the application of IAS and AI technologies to increase the efficiency of AE LC management.

Based on a systematic analysis, a comparison between the traditional time-based maintenance model and the predictive maintenance model was performed. Methods of machine learning and deep learning were used to substantiate the application of AI, and a structural diagram of the IAS was developed to demonstrate integration.

The direction of technical operation transformation the transition to condition-based maintenance is substantiated in the work. It is proven that this transition is enabled by AI-analytics, which performs fault prognosis and remaining useful life prediction. The authors have identified a typical IAS architecture that integrates onboard data with ground systems. Based on this, a structural diagram for the integration of IAS and AI modules was developed, where the results of prognostic analytics directly form maintenance plans and support the making of engineering decisions.

The effectiveness of implementing AI models is established. Specifically, it is shown that the use of AI makes it possible to reduce fuel consumption by 5–8%, decrease aircraft downtime by 15–20%, and lower the number of unscheduled failures of critical components by 25–30%.

The results of the study provide a methodological basis for implementing intelligent decision support systems in aviation enterprises. The digitalization of AE LC management ensures an increase in safety levels, a reduction in operating costs, and a significant improvement in technical condition prognosis.

Key words: *information-analytical systems, artificial intelligence, lifecycle management, aviation equipment, predictive maintenance, remaining useful life, digital twin, big data.*

Formulation of the problem. The modern aviation industry is characterized by the rapid growth of data volumes generated at all stages of the aviation equipment (AE) lifecycle, from design and manufacturing to operation, maintenance (MRO), and disposal. Concurrently, there is a high level of complexity combining the integration of digital

systems with intelligent sensors and adaptive control tools, as well as modern composite materials.

At the same time, the aviation industry faces the necessity of ensuring the highest standards of flight safety, economic efficiency, and environmental sustainability. The systematic process of aviation equipment lifecycle management (AE LCM) includes

planning, creation, commissioning, ensuring technical readiness, modernization, resource extension, and disposal of aircraft and their components.

A large amount of data from various sources enters these systems. Traditional information processing systems are becoming insufficient for making operational and strategic decisions.

The implementation of information-analytical systems (IAS) and artificial intelligence (AI) methods allows for the creation of an integrated environment supporting management decisions throughout the entire AE LCM. AI models provide deep processing of large data arrays, fault prediction, maintenance optimization, increased flight safety, and economic efficiency of operations.

The integration of AI into AE LCM systems is becoming a global trend. Flight data monitoring platforms, predictive maintenance systems, aircraft digital twins, machine learning systems, and big data already allow for cost reduction by 10–30%, risk mitigation, and improved reliability of aviation systems.

Analysis of recent research and publications.

Aviation equipment (AE) lifecycle management (LCM) in modern conditions is marked by an active transition from traditional approaches to digital technologies. Studies show that classical approaches, formed on the basis of regulatory documents from ICAO, EASA, and FAA, define fundamental requirements but do not fully account for the capabilities of modern information-analytical systems (IAS) and AI. This drives increased attention toward digital platforms and prognostic analytics methods as the basis for a new paradigm in technical operation.

A crucial layer of research belongs to the developments of aerospace companies, where digital ecosystems such as Airbus Skywise and Boeing Airplane Health Management demonstrate significant potential in collecting large volumes of operational data. Materials from Honeywell emphasize the effectiveness of combining IoT-sensorics and artificial intelligence for operational diagnosis of aircraft systems [1], confirming the global trend toward shifting from reactive to predictive maintenance.

Work [2] details the application of deep learning, particularly LSTM and CNN architectures, for analyzing the C-MAPSS dataset and modeling aircraft engine failures. Contemporary studies advance these approaches, as authors in [3, 4] demonstrate the effectiveness of deep learning algorithms for resource estimation tasks. In work [5], the authors confirm the ability of AI models to form a holistic concept of prognostic analytics within the management of aviation system LCs.

In scientific publications of recent years, interest in the digital twin concept has significantly increased. Digital twins allow the physical model of the aircraft to be combined with a virtual one, ensuring a continuous cycle of diagnosis and prediction. In the works authors [6, 7, 8], the digital twin is viewed as a key technology for optimizing maintenance, resource planning, and reducing the number of unscheduled failures. Additional studies, published in journals such as *Sensors* and *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, demonstrate the successful integration of IoT platforms with AI modules to create comprehensive decision support systems in the aviation sector [9, 10, 11].

Work [12] examines mathematical modeling of technical condition, optimization of maintenance schedules, and the capabilities of neural networks for fault prediction. Although existing research lays an important methodological foundation, most studies focus on specific aspects of technical operation or traditional analysis methods. This necessitates comprehensive approaches capable of integrating modern AI technologies, digital twins, big data, and IoT systems into a unified LC management architecture. The analysis of sources confirms that global practice is moving toward creating integrated information-analytical platforms with powerful AI analytics, which ensure the transition to prognostic maintenance, reduction of failures, and optimization of costs throughout the entire lifecycle of aviation equipment. Concurrently, there is a deficit of research that comprehensively examines the methods for integrating such technologies into the AE LCM system, which affirms the relevance and necessity of further scientific development in this area.

Task statement. The goal of this research is to substantiate approaches to the application of IAS and AI technologies to enhance the efficiency of aviation equipment lifecycle management. To achieve this goal, it is necessary to sequentially address a number of primary objectives, focusing on the methods, models, and IAS used for monitoring, analysis, and forecasting the technical condition of aviation equipment throughout its lifecycle:

- to analyze the current state of AE LCM and identify the problems and limitations of existing approaches to monitoring and maintenance;
- to substantiate the feasibility of applying artificial intelligence technologies (machine learning, deep models, prognostic algorithms) for assessing the technical condition and remaining useful life of aviation component units;
- to develop a structural scheme for the integration of IAS and AI into the aviation equipment lifecycle management system;

– to determine the prospects for the digitalization of AE LCM processes based on modern AI-oriented technologies.

Outline of the main material of the study. The aggregate stages of an aviation product's existence, from the moment the concept is formed to its disposal, constitute its lifecycle (LC). Each stage has its own information flows and specifics, which necessitates a change in the technical operation paradigm and creates the foundation for the application of information-analytical systems.

It is established that the traditional approach was based on a scheduled maintenance model, where service intervals were determined by operating hours or calendar time. A number of significant drawbacks of this approach were identified: the inability to account for individual operating conditions, the risk of «overstating» maintenance volumes, high spare parts inventory costs, and the probability of failing to detect early signs of failure.

Based on this, the necessity of transitioning to a digital LC management model is justified, with its key element being condition-based maintenance (CBM). Thanks to CBM, it becomes possible to predict failures based on the analysis of historical

data and to optimize resources to enhance safety and reliability. Predictive maintenance accounts for the individual behavior of components, providing remaining useful life (RUL) prediction, anomaly detection, and analysis of degradation trends, which leads to a reduction in unscheduled failures.

To realize the CBM concept, the typical architecture of the IAS has been investigated and defined. This multi-level digital platform integrates data collection tools from sensors, flight recorders, telemetry channels (ACARS, SATCOM, ADS-B), as well as centralized big data storage of the data lake type. Based on the collected information, monitoring modules and intelligent AI/ML-analytics components function, providing deep data processing, parameter forecasting, and support for decision-making. Such an integrated structure allows for the creation of a holistic digital loop for managing the AE condition.

The IAS provides comprehensive processing of heterogeneous data flowing from onboard monitoring systems, ground maintenance platforms, logistics MRO systems, and aerodrome information systems. Figure 2 demonstrates the main functions that the IAS performs at each stage of the LC.

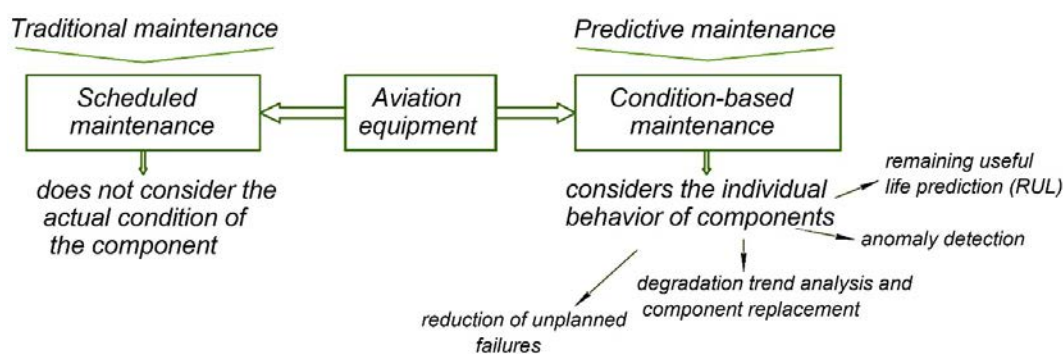


Fig. 1. Comparison of maintenance models

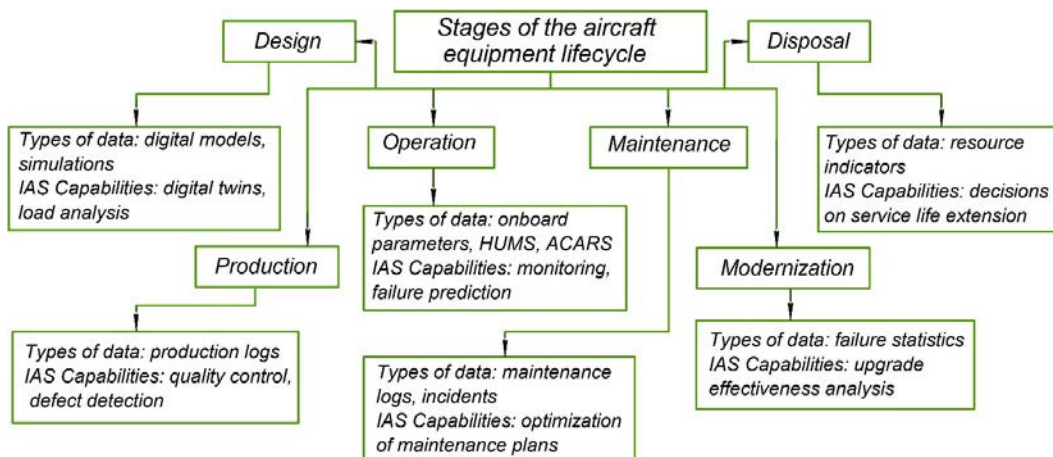


Fig. 2. Main functions of IAS at different stages of aviation equipment lifecycle

AI-analytics is a critically important component. Artificial intelligence technologies are utilized to ensure deep processing of heterogeneous data arrays that flow not only from the aircraft but also from ground-based MRO systems.

Based on the conducted analysis, the application of specific AI algorithms for solving the main problems of technical operation is substantiated. Machine learning (ML) algorithms and deep learning (DL) neural networks, particularly for time series analysis, are applied for remaining RUL prediction and real-time modeling of component degradation processes. Computer vision and NLP additionally provide automated defect detection and technical documentation analysis.

This approach forms the foundation for predictive maintenance (PdM), where the use of AI ensures early anomaly detection, forecasting the need for component replacement, and reducing the number of unscheduled failures by 40–60%. It is also established that AI is capable of increasing operational efficiency by optimizing flight modes, analyzing the impact of the human factor, automatic load monitoring, and minimizing fuel consumption.

An analysis of the results of implementing AI models in global practice demonstrates significant advantages. Specifically, it is established that after AI implementation, fuel consumption is reduced by 5–8%, aircraft downtime by 15–20%, and the number of critical component failures decreases by 25–30%. Furthermore, the time required for finding the causes of failures is reduced by 60–70%. These data are graphically illustrated in Figure 3, which demonstrates the proportion of reduction in key operational indicators due to AI analytics.

It is confirmed that the application of AI and integrated aviation systems covers all stages of the AE lifecycle, forming a continuous flow of data and decisions. At the design stage, AI algorithms enable the modeling of characteristics and prediction of material behavior. In manufacturing, IAS ensures increased quality control accuracy.

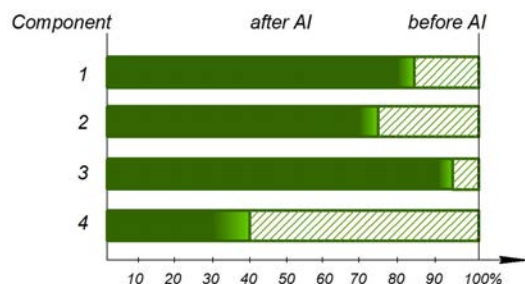


Fig. 3. Results of AI model implementation in global practice: 1 – fuel consumption, 2 – aircraft downtime, 3 – critical component failures, 4 – time required for root-cause analysis

During operation, AI analyzes flight parameters and evaluates crew performance efficiency, while at the maintenance stage, intelligent models determine the optimal time for procedure execution and predict failures. At the final stage of the lifecycle, systems evaluate the economic feasibility of resource extension and model disposal scenarios.

To visualize the interaction of key elements, a structural scheme (Figure 4) has been developed and presented, which illustrates the integration of IAS and AI modules into the maintenance management complex.

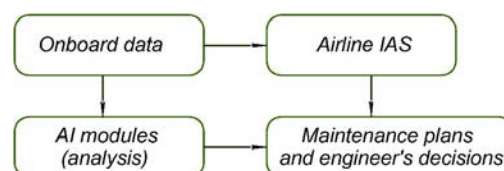


Fig. 4. Scheme of IAS integration into the maintenance management complex

The scheme demonstrates that telemetry sources and onboard data flow into the central airline IAS for aggregation. Subsequent parameter processing is carried out by AI modules, which perform technical condition prognosis and automatic recommendation generation. The results of this analysis directly form the maintenance plans and engineer decisions, which are coordinated based on analytical conclusions.

Thus, it is confirmed that intelligent AI models are not merely an additional tool, but a central element that ensures the transition from reactive to proactive management of the entire aviation equipment lifecycle.

Based on the conducted research, it is substantiated that the integration of IAS and AI technologies forms a new standard for AE LCM.

Conclusions. The main direction of technical operation transformation, the transition from the scheduled preventive model to CBM, is established. It is proven that this transition depends on the implementation of AI-analytics, which allows for failure prognosis and remaining useful life prediction.

The functional architecture of the IAS is substantiated as ensuring the continuous collection, processing, and analysis of heterogeneous data (onboard, operational, MRO). This integrated digital ecosystem guarantees high accuracy of analysis and predictability of engineering decisions.

The main economic and operational advantages of applying AI are determined, including a significant reduction in operating costs (specifically, fuel and downtime) and an increase in safety levels due to proactive anomaly detection.

It is confirmed that AI models are a central element that ensures the proactive management of the AE lifecycle at all its stages, from the optimization of structural solutions during the design phase to the assessment of the economic feasibility of resource extension.

Bibliography:

1. Honeywell Connected Aircraft: Predictive Maintenance Solutions. URL: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/services/connected-aircraft>
2. Salinas-Camus M., Eleftheroglou N. Uncertainty in Aircraft Turbofan Engine Prognostics on the C-MAPSS Dataset. PHM Society European Conference, 8(1), 10. 2024. <https://doi.org/10.36001/phme.2024.v8i1.4007>
3. Balaban E., Saxena A. Prognostics for Complex Aviation Systems Using Machine Learning. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society (PHM Society Proceedings), Vol. 10, No. 1, 2019. P. 357–367.
4. Sipsos M. Deep Learning for Remaining Useful Life (RUL) Prediction in Turbofan Engines. *IEEE Transactions on Reliability*. 69(1). 2020. 329–342. doi:10.1109/TR.2019.2942488
5. Saez D., Royo P. AI-Based Methods for Aircraft Lifecycle Management: From Condition Monitoring to Predictive Analytics. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 24(5). 2020. 456–468. doi:10.1080/15472450.2019.1685858
6. Li X., Oliver J. Digital Twin in Aerospace Applications. *Aerospace Science and Technology*. 2021. 119. doi:10.1016/j.ast.2021.106880
7. Zhang H. Digital Twin–Driven Maintenance for Aircraft Systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. 115. doi:10.1016/j.engappai.2022.105260
8. Li X., Li Y. Digital Twins for Aircraft Maintenance and Lifecycle Optimization. *Aerospace Science and Technology*. 2021. 116. doi:10.1016/j.ast.2021.106877
9. Ienina I. I., Chornohor N. O. Analysis of Digital Technologies with IoT for the Maintenance of Aviation Equipment. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 36(2). 2025. 228–233. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/34>
10. Zhao Y., Liu Q. Integration of IoT and AI for Aviation Maintenance Decision Support. *Sensors*. 22(18). 2022. doi:10.3390/s22187012
11. Oliver J., Becker M. AI-Based Reliability Modeling of Aircraft Systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Том 112. 2022. doi:10.1016/j.engappai.2022.104778
12. Степаненко В. Особливості застосування нейронних мереж для прогнозування відмов авіаційних агрегатів. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. (168). 2020. С. 58–63.

Єніна І.І., Чорногор Н.О., Мацуй А.М. ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИХ СИСТЕМ ТА АІ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

У статті розглядаються підходи до застосування інформаційно-аналітичних систем та технологій штучного інтелекту з метою підвищення ефективності управління життєвим циклом авіаційної техніки. Автори показують, що сучасна авіаційна галузь зіштовхується з проблемою експоненціального зростання обсягів даних, які генеруються на всіх етапах ЖЦ, від проєктування до експлуатації. Традиційні системи аналізу визнані недостатніми для прийняття оперативних стратегічних рішень, що вимагає впровадження інтегрованого середовища підтримки управління.

Актуальність дослідження обґрунтовується необхідністю розробки комплексних підходів, здатних інтегрувати сучасні ІАС та АІ у єдину архітектуру управління ЖЦ АТ. Проведений аналіз останніх досліджень підтверджує, що інтеграція АІ-аналітики, великих даних, IoT-сенсорики та концепції цифрових двійників є глобальним трендом. Автори вказують на обмеженість робіт, які комплексно розглядають методи інтеграції цих технологій у систему управління ЖЦ АТ як цілісний процес. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні підходів до застосування ІАС та технологій АІ для підвищення ефективності управління ЖЦ АТ.

На базі системного аналізу проведено порівняння традиційної планово-попереджувальної моделі технічного обслуговування з моделлю прогностичного обслуговування. Для обґрунтування застосування штучного інтелекту використано методи машинного та глибокого навчання, а для демонстрації інтеграції розроблено структурну схему ІАС.

У роботі обґрунтовано напрямок трансформації технічної експлуатації по переходу до обслуговування за реальним технічним станом. Доведено, що цей перехід забезпечується АІ-аналітикою, яка здійснює прогнозування відмов та залишкового ресурсу. В статті визначено типову архітектуру ІАС, яка інтегрує бортові дані із наземними системами. На основі цього розроблено структурну схему інтеграції ІАС та АІ-модулів, де результати прогностичної аналітики безпосередньо формують плани ТО та підтримують прийняття інженерних рішень.

Встановлено ефективність впровадження АІ-моделей. Зокрема, показано, що використання АІ дозволяє скоротити паливні витрати на 5–8%, зменшити час простоювання літаків на 15–20% та знизити кількість незапланованих відмов критичних вузлів на 25–30%.

Результати дослідження надають методологічний базис для впровадження інтелектуальних систем підтримки рішень в авіаційних підприємствах. Цифровізація управління ЖЦ АТ забезпечує підвищення рівня безпеки, зменшення експлуатаційних витрат та значне покращення прогнозування технічного стану.

Ключові слова: інформаційно-аналітичні системи, штучний інтелект, управління життєвим циклом, авіаційна техніка, прогностичне технічне обслуговування, залишковий ресурс, цифровий двійник, великі дані.

Дата надходження статті: 17.11.2025

Дата прийняття статті: 05.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 656.025.2
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/38>

Захарчук В.Б.

Західноукраїнський національний університет

Мамрош І.М.

Західноукраїнський національний університет

Захарчук О.П.

Західноукраїнський національний університет

Здреник В.С.

Західноукраїнський національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ТАКСОМОТОРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У МІСТІ ТЕРНОПІЛЬ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У статті досліджено ефективність міських таксомоторних перевезень у Тернополі в умовах переходу на електромобілі. Сучасний розвиток міського транспорту потребує переходу до енергоефективних та екологічно чистих технологій, особливо у сфері таксомоторних перевезень, які мають значний вплив на екологічну ситуацію міста. Традиційні таксі з двигунами внутрішнього згоряння спричиняють підвищене споживання пального, зростання експлуатаційних витрат та рівня викидів CO₂, що актуалізує необхідність переходу на електротранспорт.

У статті досліджено питання підвищення енергоефективності міських таксопарків шляхом впровадження електромобілів та створення відповідної інфраструктури заряджання на прикладі міста Тернопіль. Проаналізовано сучасні наукові джерела, присвячені електрифікації транспортних систем, оптимізації маршрутів та розробці ефективних моделей зарядної інфраструктури (Castillo-Calderón, Bauer, Phadke та ін.). Проведено розрахунки річного обсягу пасажирських перевезень, визначено середньодобовий пробіг таксі (187,65 км), середню відстань поїздки (9,95 км), коефіцієнт використання автопарку (0,895) та продуктивність одного автомобіля, котра становить близько 17,6 тисяч пасажирів на рік. Визначено на основі кількості автомобілів-таксі, котрі забезпечать потреби міста Тернопіль у таксомоторних перевезеннях. Розраховано потребу у зарядних станціях для електричного автопарку: оптимальним є поєднання 40–45 повільних AC-зарядок потужністю двадцять два кіловата для нічного підзаряджання та 15–20 швидких DC-станцій для денного використання. Розраховано загальну вартість інфраструктури заряджання, котра становить 26,24 млн грн. Проведено порівняння експлуатаційних витрат для традиційних та електричних таксі: при середньому річному пробігу 60 234 км річні витрати на паливо для автопарку з 188 авто становлять близько 43,84 млн грн, тоді як вартість електроенергії при пільгових тарифах у кілька разів нижча. Отримані результати доводять економічну доцільність електрифікації міського таксопарку, що сприятиме скороченню витрат, підвищенню якості транспортного обслуговування та зменшенню негативного впливу на довкілля. Матеріали статті можуть бути використані для оптимізації таксомоторних міст України, а отримані результати забезпечують наукове підґрунтя для реального переходу міських таксі на енергоефективні технології, сприяючи зниженню експлуатаційних витрат, поліпшенню екологічної ситуації та підвищенню комфортності міських перевезень.

Ключові слова: таксі, електромобілі, енергоефективність, міські перевезення, зарядна інфраструктура.

Постановка проблеми. Послуги таксі займають важливе місце в системі міських перевезень, адже забезпечує комфортні, швидкі та гнучкі спо-

соби пересування як для мешканців, так і для відвідувачів міста. Проте традиційні підходи до організації роботи таксомоторного транспорту часто

призводять до перевантаження дорожньої мережі, надмірного використання пального та збільшення обсягів шкідливих викидів. Застосування енергоощадних і сучасних технологій дає можливість підвищити якість транспортних послуг, зменшити витрати на їх надання та мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Інноваційні рішення в галузі енергоефективності суттєво трансформують транспортну систему, забезпечуючи раціональніший рух автомобілів, удосконалення маршрутів і зниження сумарного споживання енергії. Такі зміни сприяють не лише покращенню екологічних показників міського транспорту, а й зменшенню експлуатаційних витрат, що в комплексі позитивно позначається на зручності, доступності та якості обслуговування пасажирів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У зв'язку з посиленням уваги до екологічної безпеки та впровадження інноваційних технологій у транспортну сферу, спостерігається помітне зростання кількості наукових робіт, присвячених підвищенню ефективності міських перевезень. Поглиблений аналіз наукових джерел свідчить, що найбільш наближені за тематикою до даного дослідження праці належать переважно іноземним ученим. Їхні результати доводять, що успішна інтеграція енергоощадних технологій у роботу транспортних систем можлива лише за умови комплексного вдосконалення інфраструктури зарядних станцій та одночасної оптимізації процесів маршрутизації й диспетчерського управління. У статті Castillo-Calderón та інших [2] змодельоване енергоспоживання електромобіля-таксі, котрий працює у середньому місті. Конкретні розрахунки витрат електроенергії можна адаптувати до міст України. Стаття Bauer, G. S., Phadke, A. та ін. [3] присвячена питанню повної електрифікації міської інфраструктури, на основі організації зарядної інфраструктури. В праці представлено змодельовано роботу великого автопарку із врахуванням щоденного пробігу, часу простою та тарифів на електроенергію. Враховано доступність різних типів зарядок (AC та DC) [4]. Доведено, що правильне поєднання повільних і швидких зарядних станцій може звести до мінімуму експлуатаційні витрати електротаксі.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є підвищення ефективності функціонування міських таксомоторних перевезень в умовах зростання вартості енергоносіїв і необхідності скорочення обсягів шкідливих викидів, а також обґрунтування економічної доцільності переходу

таксомоторного парку міста Тернополя на енергоощадні технології.

Виклад основного матеріалу. За відомою формулою розрахуємо річний обсяг перевезень пасажирів автомобілями-таксі для міста Тернопіль:

$$Q_m^{р\acute{и}ч} = \frac{N_M \cdot n_{поїзд} \cdot \mu}{100\%} \quad (1)$$

де N_M – кількість мешканців у місті, тис. чол.;
 $n_{поїзд}$ – кількість поїздок одного мешканця міста за рік;
 μ – відсоток обсягу міських перевезень, який здійснюється автомобілями-таксі, %.

Для міста Тернопіль $N_M = 225$ тис. чол.,
 $n_{поїзд} = 150$, $\mu = 10\%$ [5].

$Q_m^{р\acute{и}ч} = 3,375$ тис. пасажирів. Для визначення продуктивності одного автомобіля-таксі за рік ($W_m^{р\acute{и}ч}$) у місті Тернопіль, скористаємося відомою формулою:

$$W_m^{р\acute{и}ч} = \frac{365 \cdot L_m^{доб} \cdot q_m \cdot \gamma_m \cdot \beta_{пл} \cdot \alpha_\theta}{L_m^{сп}} \quad (2)$$

де $L_m^{доб}$ – середньодобовий пробіг автомобіля-таксі, км;

q_m – середнє заповнення таксомотора, пас;

γ_m – середній коефіцієнт заповнення;

$\beta_{пл}$ – коефіцієнт платного пробігу;

α_θ – коефіцієнт використання автопарку;

$L_m^{сп}$ – середня відстань поїздки пасажирів, км.

Статистичні показники було отримано шляхом аналізу діяльності таксомоторних автомобілів різних класів, що експлуатуються у декількох підприємствах, які здійснюють перевезення пасажирів у форматі таксі. Для розрахунку середньодобового пробігу було опрацьовано інформацію про сумарну відстань, подолану кожним транспортним засобом протягом місяця, за умови його використання виключно для виконання таксомоторних перевезень (табл. 1).

Середньодобовий пробіг автомобіля таксі становить $L_m^{доб} = 187,65$ км. Середньомісячний пробіг $L_m^{міс} = 5019,52$ км.

Коефіцієнт використання автопарку (КВА) показує, наскільки інтенсивно використовуються автомобілі у таксопарку, порівняно з максимально можливою кількістю робочих днів у місяці. Розраховується він за формулою:

$$KBA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{D_{max}} \quad (3)$$

де N – загальна кількість автомобілів;

D_i – фактична кількість робочих днів для кожного автомобіля,

D_{max} – максимальна можлива кількість робочих днів (у нашому випадку 30).

Таблиця 1

Кількість робочих днів транспортних засобів підприємств протягом місяця

Підприємство	№ п.п. ТЗ	Марка авто	Місячний пробіг, км	Кількість робочих днів	Середньо-добовий пробіг, км
Таксі Пілот	1	Volkswagen Passat B5	5000	25	200
Таксі Пілот	2	Skoda Octavia	4941	27	183
Таксі Пілот	3	Skoda Octavia G-TEC	4S60	27	180
Таксі Пілот	4	Volkswagen Passat B6	5264	28	188
Таксі Пілот	5	Mitsubishi Lancer	4675	25	187
Таксі 838	6	Volkswagen Passat B7	4675	25	187
Таксі 838	7	Audi A6	4968	25	184
Таксі 838	8	Renault Logan MCV	4575	27	183
Таксі 838	9	Toyota Corolla 2.0 D-4D	5319	27	197
Таксі 838	10	Hyundai Accent Blue	4914	26	182
Uklon	11	Skoda Octavia Combi	5346	27	198
Uklon	12	Renault Logan TCe	5404	27	193
Uklon	13	Volkswagen Passat TDI	4887	27	181
Uklon	14	Hyundai Accent RB	5040	27	180
Uklon	15	Renault Logan Stepway	5096	28	182
Opti таксі 579	16	Skoda Octavia III	4650	25	186
Opti таксі 579	17	Daewoo Lanos	5236	28	187
Opti таксі 579	18	Volkswagen Passat Variant	5488	28	187
Opti таксі 579	19	Toyota Corolla 1.4 D-4D	5572	28	199
Opti таксі 579	20	Opel Vivaro	4500	27	180
Opti таксі 579	21	Mercedes-Benz Viano	5000	25	200

У проведеному аналізі середнє значення коефіцієнта використання парку становить 0,895, що свідчить про те, що в середньому кожен автомобіль задіяний у роботі приблизно на 89,5% від свого потенційного часу.

Для дослідження було зібрано статистичні дані щодо кількості викликів 21 транспортного засобу протягом одного місяця (жовтень 2025 року). Для кожного автомобіля зафіксовано кількість виконаних замовлень по днях, що дало змогу оцінити нерівномірність навантаження в різні дні місяця. На основі цих даних побудовано теплову карту (heatmap), подану на рисунку 1, яка візуалізує інтенсивність роботи транспортних засобів.

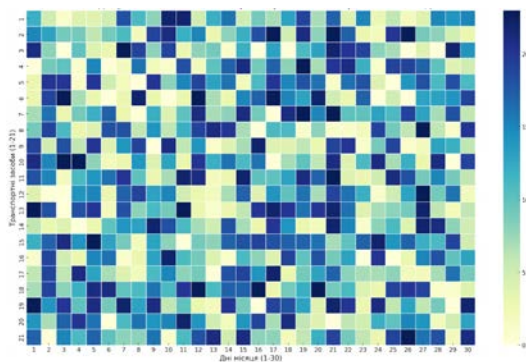


Рис. 1. Теплова діаграма викликів транспортних засобів протягом місяця

Середня дальність однієї поїздки:

$$L_m^{cp} = \frac{L_m^{доб.}}{N_{поїздок,д}} \quad (4)$$

де $N_{поїздок,д}$ – загальна кількість поїздок автомобіля-таксі за добу.

$$L_m^{cp} = \frac{187,65}{18,86} = 9,95$$

Візьмемо наступні коефіцієнти із статистичних даних відповідно до кількості населення міста $q_m = 2.5$ пас./поїздки, $\gamma_m = 0.8$, $\beta_{щ} = 0.75$. $W_m^{річн} = 17\,598$ пасажирів на рік, це означає, що один автомобіль таксі в середньому перевозить близько 17,6 тис. пасажирів щорічно за наведених умов експлуатації.

Розрахована облікова кількість автомобілів-таксі для Тернополя розраховується із залежності:

$$N_a = \frac{1000 \cdot Q_m^{річн} \cdot n_{поїзд}}{W_m^{річн}} \quad (5)$$

Приблизна кількість таксі, необхідна для забезпечення річного обсягу перевезень пасажирів у місті Тернопіль $N_a = 188$ автомобілів.

Проведемо розрахунок таксопарку для міста. Для таксопарку, що складається з $N_a = 188$ електро-мобілів, число зарядних станцій необхідних для безперебійної роботи залежить від типу зарядних пристроїв, графіка роботи автомобілів та часу, нео-

бжідного на підзарядку. Для повної зарядки електромобіля повільною зарядною станцією змінного струму (АС) потужністю 7–22 кВт потрібно 4–8 годин, тому вони для нічного заряджання. Швидкі зарядні станції постійного струму (DC), потужність яких складає 50–150 кВт заряджають автомобіль за 30–90 хвилин, що дозволяє підтримувати безперервну роботу таксі у кілька змін. Найпотужніші ультрашвидкі зарядні станції (150+ кВт) здатні зарядити батарею електромобіля всього за 15–30 хвилин, тому є оптимальними для інтенсивної експлуатації.

Три цілодобовій роботі таксопарку потрібно більше станцій швидкого заряджання. Якщо ж автопарк працює лише у денний час, а вночі всі транспортні заряджаються, можна обійтися меншою кількістю точок підключення. Згідно з розрахунками за умови використання повільних АС-зарядок вночі одна станція може зарядити приблизно 3 електромобілів, тому для парку з 188 автомобілів потрібно близько 62–63 зарядних станцій. За умови використання швидких DC-зарядних пристроїв потужністю 50–150 кВт, одна станція може зарядити 4–5 електромобілів, що скорочує необхідну кількість зарядних точок до 38–47.

Отже ефективну роботу таксопарку, що складається з 188 електромобілів, забезпечить поєднання повільних та швидкісних зарядок, що дозволять оперативно підзаряджати автомобілі вдень. Розрахуємо загальну суму зарядних станцій (табл. 2).

За результати тестів [6], що Mitsubishi i-MiEV має еквівалентну паливну економічність 126 mpg у міському циклі та 99 mpg у заміському, Nissan Leaf володіє нижчими показниками – 106 mpg у місті та 92 mpg за містом.

Витрата електроенергії таких транспортних засобів залежить від стилю водіння, погодних умов, рельєфу місцевості та використання кліматичних систем. Для Nissan Leaf першого покоління з батареєю 24 кВт·год середнє енергоспоживання становить приблизно 0,15–0,18 кВт·год/км. У більш пізніх версіях із батареєю 40 кВт·год витрата електроенергії знижується до 0,13–0,15 кВт·год/км завдяки вдосконаленій енергоефективності. Модифікація з батареєю 62 кВт·год має трохи вищу витрату, яка може

сягати 0,15–0,17 кВт·год/км, що пов'язано з більшою вагою автомобіля.

Визначимо середній річний пробіг автомобіля-таксі, виходячи із вище отриманих даних $L_m^{mic} = 5019,52$ км, скориставшись формулою:

$$L_{pich} = L_m^{mic} \cdot 12 \quad (5)$$

$$L_{pich} = 5019,52 \cdot 12 = 60\,234,29 \text{ км}$$

Для проєктованого таксопарку автомобілів, котрі працюють на рідкому паливі річні витрати становлять:

$$E_p = \frac{L_{pich} \cdot N_a}{100} \cdot c \cdot r \quad (6)$$

де c – ціна на паливо, грн;

r – середній розхід палива, л/100 км;

Розрахуємо середні витрати на паливо становлять:

$$V_n = \sum c \cdot r = 387,14 \text{ грн} / 100 \text{ км.}$$

Розрахуємо річні витрати на пальне автомобілів таксі на рідкому паливі:

$$E_p = \frac{L_{pich} \cdot N_a}{100} \cdot V_n = \frac{60\,234,29 \cdot 188}{100} \cdot 387,14 = 43839913,70 \text{ грн.}$$

Враховуючи ККД зарядного пристрою, отримуємо ціну 1 кВт·год. енергії C_{ElTAB} , грн/кВт·год:

$$C_{Електро} = \frac{C_{кВм}}{\eta} \cdot 100\% \quad (7)$$

де $C_{кВм}$ – тариф на електроенергію за 1 кВт·год;
 η – ККД зарядного пристрою, %.

Вартість електроенергії $C_{Електро}$, грн/кВт·год, що витрачає електромобіль на подолання 1 км шляху, можна розрахувати за формулою:

$$C_{Електро} = W_{El} \cdot C_{ElTAB} \quad (8)$$

де W_{El} – витрата електроенергії акумуляторної батареї електромобіля для подолання 1 км шляху, кВт·год/км. Підставимо формулу 7 у формулу 8 та отримаємо:

$$C_{Електро} = W_{El} \cdot \frac{C_{кВм}}{\eta} \cdot 100\% \quad (9)$$

Розрахуємо загальну вартість електроенергії, спожиту автомобілями-таксі протягом року при річному пробігу $L_{pich} = 60\,234,29$ км для таксопарку, який складається з $N_a = 188$ електромобілів.

$$E_e = C_{Електро} \cdot L_{pich} \cdot N_a \quad (10)$$

$$E_e = W_{El} \cdot \frac{C_{кВм}}{\eta} \cdot 100\% \cdot L_{pich} \cdot N_a$$

Таблиця 2

Розрахунок вартості зарядних станцій

Тип зарядної станції	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Загальна вартість, грн.
АС 22 кВт	42	78603	3301326
DC 60 кВт	9	1069430	9624870
DC 120 кВт	9	1479557	13316013

Витрати пального та середній розхід транспортних засобів таксі

Підприємство	№ п.п ТЗ	Марка авто	Вид палива	Середній розхід полива, л/100км	Витрати на пальне, грн/100км
Таксі Пілот	1	Volkswagen Passat B5	Дизель	6.5	390
Таксі Пілот	2	Skoda Octavia	Бензин	7.0	420
Таксі Пілот	3	Skoda Octavia G-TEC	Газ	4.5	270
Таксі Пілот	4	Volkswagen Passat B6	Дизель	6.0	360
Таксі Пілот	5	Mitsubishi Lancer	Бензин	7.5	450
Таксі 838	6	Volkswagen Passat B7	Дизель	6.2	372
Таксі 838	7	Audi A6	Бензин	8.5	510
Таксі 838	8	Renault Logan MCV	Дизель	5.8	348
Таксі 838	9	Toyota Corolla 2.0 D-4D	Дизель	5.5	330
Таксі 838	10	Hyundai Accent Blue	Бензин	6.7	402
Uklon	11	Skoda Octavia Combi	Бензин	6.3	378
Uklon	12	Renault Logan TCe	Бензин	5.9	354
Uklon	13	Volkswagen Passat TDI	Дизель	5.7	342
Uklon	14	Hyundai Accent RB	Бензин	6.1	366
Uklon	15	Renault Logan Stepway	Дизель	5.6	336
Opti таксі 579	16	Skoda Octavia III	Бензин	6.4	384
Opti таксі 579	17	Daewoo Lanos	Бензин	8.0	480
Opti таксі 579	18	Volkswagen Passat Variant	Дизель	5.5	330
Opti таксі 579	19	Toyota Corolla 1.4 D-4D	Дизель	5.0	300
Opti таксі 579	20	Opel Vivaro	Дизель	7.8	468
Opti таксі 579	21	Mercedes-Benz Viano	Дизель	9.0	540

Приймемо для запропонованих транспортних засобів $W_{El} = 0.15$ кВт·год/км.

Тарифи на електроенергію в Україні (жовтень 2025) різняться залежності від категорії споживачів та умов використання: побутові споживачі – 4,32 грн за 1 кВт·год, пільговий тариф для споживачів з електроопаленням у період з 1 жовтня по 30 квітня, до 2000 кВт·год на місяць, – 2,64 грн за 1 кВт·год, понад 2000 кВт·год на місяць – 4,32 грн за 1 кВт·год. При наявності двозонного лічильника, тариф у денний час з 7:00 до 23:00 становить 4,32 грн за 1 кВт·год, а в нічний час з 23:00 до 7:00 – 2,16 грн за 1 кВт·год. Для зарядних станцій електромобілів тарифи різняться залежно від типу станції. Домашні зарядки мають нічний тариф 2,64 грн за 1 кВт·год та денний тариф 4,32 грн за 1 кВт·год. Зарядні станції мають різні тарифи залежно від потужності: для АС-станцій (перемінний струм, до 22 кВт) тариф становить приблизно 13,60 грн за 1 кВт·год, а для DC-станцій (швидкісні зарядки, постійний струм) – приблизно 17,36 грн за 1 кВт·год.

Лева частка таксомоторних перевезень забезпечується приватними автомобілями. Розрахуємо загальну вартість електроенергії для проекту при пільговому (нічному) тарифі $CI_{\kappa Bm} = 2,64$ грн, базовому тарифі $C2_{\kappa Bm} = 4,32$ грн та для зарядних станцій $C3_{\kappa Bm} \approx 15$ грн [7] для зарядних пристроїв

ККД = 92,5% = 0,925. Загальна вартість електроенергії, спожиту автомобілями-таксі протягом року при $CI_{\kappa Bm} = 2,64$ грн – $E_e = 4\,847\,916,13$ грн; при $C2_{\kappa Bm} = 4,32$ грн – $E_e = 7\,932\,953,67$ грн, при $C3_{\kappa Bm} \approx 15$ грн $E_e = 27\,544\,978$ грн. Найбільша економія досягається при використанні нічного тарифу на електроенергію, значна економія досягається і за використання денного тарифу.

Висновки. Результати проведеного дослідження підтверджують, що впровадження електромобілів у міський таксопарк Тернополя є економічно вигідним і перспективним спрямуванням розвитку транспортної мережі. Перехід на електротаксі дає можливість зменшити витрати у кілька разів, зменшити викиди шкідливих речовин. При поєднанні повільних та швидкісних зарядних станцій створюються умови для безперебійну роботу парку, зводяться до мінімуму простої та покращується якість транспортних послуг. За результатами розрахунків можна зробити висновок, що навіть за умов високих тарифів на електроенергію витрати залишаються значно нижчими, ніж у випадку використання автомобілів на рідкому паливі, а при нічних тарифах економічний ефект є максимальним. Запропонована модель може бути використана як основа для модернізації інших міських таксопарків України.

Список літератури:

1. Zinchenko D., Blinov A., Chub A., Vinnikov D., Verbytskyi I., Bayhan S. High-Efficiency Single-Stage On-Board Charger for Electrical Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Volume: 70, Issue: 12, December 2021. 12581–12592. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9563234>
2. Castillo-Calderón J., Cordero-Moreno D., Larrodé Pellicer E. (2024). A model-driven approach for estimating the energy performance of an electric vehicle used as a taxi in an intermediate Andean city. *Energies*, 17(23). 6053. URL: <https://doi.org/10.3390/en17236053>. (дата звернення: 18.06.2025).
3. Bauer G. S., Phadke A., Greenblatt J. B., Rajagopal D. Electrifying urban ridesourcing fleets at no added cost through efficient use of charging infrastructure. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. 105. 385–404.
4. Wang G., Chen Y., Wang S., Zhang F., Zhang D. ForETaxi: Data-Driven Fleet-Oriented Charging Resource Allocation in Large-Scale Electric Taxi Networks. *ACM Journals. ACM Transactions on Sensor Networks*. Vol. 19, No. 3. URL: <https://dl.acm.org/doi/full/10.1145/3570958>
5. Звіт за результатами НДР «Оптимізація управління пасажирськими перевезеннями громадським транспортом у ТМТГ в частині економії використання бюджетних коштів» / Управління транспортних мереж та зв'язку Тернопільської міської ради. Державний реєстраційний номер 0122U202011. Тернопіль, 2022. 46 с.
6. Quick Comparison: 2011 Nissan Leaf vs. 2012 Mitsubishi i-MiEV. URL: https://www.motortrend.com/reviews/2011-nissan-leaf-vs-2012-mitsubishi-i-miev?utm_source=chatgpt.com. (дата звернення: 03.07.2025).
7. Павлов В.Б., Подольцев О.Д., Павленко В.Є. (2021). Дослідження експериментального зразка бездротового зарядного пристрою електромобіля. *Технічна електродинаміка*. (5). 21–26. <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.021>

Zakharchuk V.B., Mamrosh I.M., Zakharchuk O.P., Zdrenyk V.S. OPTIMIZATION OF TAXI TRANSPORTATION IN THE CITY OF TERNOPIL THROUGH THE INTRODUCTION OF MODERN ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES

The article examines the efficiency of urban taxi transportation in Ternopil in the context of the transition to electric vehicles. The modern development of urban transport requires the transition to energy-efficient and environmentally friendly technologies, especially in the field of taxi transportation, which have a significant impact on the ecological situation of the city. Traditional taxis with internal combustion engines cause increased fuel consumption, increased operating costs and CO₂ emissions, which makes the transition to electric transport more urgent.

The article examines the issue of increasing the energy efficiency of urban taxi fleets by introducing electric vehicles and creating an appropriate charging infrastructure using the example of the city of Ternopil. Modern scientific sources devoted to the electrification of transport systems, route optimization and the development of effective charging infrastructure models (Castillo-Calderón, Bauer, Phadke, etc.) are analyzed. Calculations of the annual volume of passenger transportation were carried out, the average daily taxi mileage (187.65 km), the average trip distance (9.95 km), the fleet utilization factor (0.895) and the productivity of one car were determined, which is about 17.6 thousand passengers per year. The number of taxi cars that will meet the needs of the city of Ternopil in taxi transportation was determined. The need for charging stations for the electric vehicle fleet was calculated: the optimal combination is 40–45 slow AC charging stations with a capacity of twenty-two kilowatts for night charging and 15–20 fast DC stations for daytime use. The total cost of the charging infrastructure was calculated, which is 26.24 million UAH. A comparison of operating costs for traditional and electric taxis was conducted: with an average annual mileage of 60,234 km, the annual fuel costs for a fleet of 188 cars are about UAH 43.84 million, while the cost of electricity at preferential tariffs is several times lower. The results obtained prove the economic feasibility of electrifying the city taxi fleet, which will help reduce costs, improve the quality of transport services and reduce the negative impact on the environment. The materials of the article can be used to optimize taxi cities in Ukraine, and the results obtained provide a scientific basis for the real transition of city taxis to energy-efficient technologies, contributing to reducing operating costs, improving the environmental situation and increasing the comfort of urban transportation.

Key words: taxis, electric vehicles, energy efficiency, urban transportation, charging infrastructure.

Дата надходження статті: 29.11.2025

Дата прийняття статті: 17.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Kyryllova O.V.

Odesa National Maritime University

Kyryllova V.Yu.

Odesa National Maritime University

SMART PORT CLUSTERS AS A MODERN TOOL FOR THE DEVELOPMENT OF THE GLOBAL TRANSPORT COMMUNICATIONS SYSTEM AND A STRATEGIC VECTOR FOR THE POST-WAR RECOVERY OF UKRAINE'S PORT INDUSTRY

The article explores Smart Port clusters as a modern tool for the development of the global transportation system and a strategic vector for the post-war restoration of Ukraine's port infrastructure. The study aims to substantiate the strategic role of Smart Port Clusters within the global transport network, assess their development prospects, and evaluate their integration into Ukraine's port infrastructure, considering contemporary technological trends and post-war recovery challenges. The focus is on analyzing innovative technologies such as digitization, automation, and the integration of digital platforms that enhance port operations, improve cargo flow management efficiency, and ensure ecological sustainability. The study also examines the implementation of artificial intelligence (AI), big data, the Internet of Things (IoT), blockchain, and digital twins to optimize and integrate transport processes in real time. Global trends in the development of smart port clusters are analyzed, including the use of autonomous vessels, robotic cargo handling systems, and automated dispatching systems. Cases from leading ports worldwide, such as Rotterdam, Singapore, and Hamburg, demonstrate the effectiveness of digital technologies in improving the competitiveness of port operations. Furthermore, the article highlights the potential of Smart Port Clusters in the post-war restoration of Ukraine's port infrastructure. The study identifies that the adoption of modern digital technologies can significantly accelerate port recovery, enhance their competitiveness at the international level, and attract investments. It also offers recommendations for integrating Ukrainian ports into global transport networks through the use of Smart Cluster models. The findings of the study show that Smart Port Clusters can significantly improve port operations by reducing operational costs, optimizing cargo flows, and decreasing environmental impact. The novelty of the work lies in investigating the potential of these clusters for restoring Ukraine's economy through their integration into global technological ecosystems. As a result, the article confirms the importance of Smart Port Clusters as a key tool for modernizing transport infrastructure, enhancing port resilience, and integrating ports into the global transport ecosystem. The proposed recommendations can be used in the development of national strategies for the port sector's recovery in the post-war period. This study is a significant contribution to the development of the Concepts of Smart Ports and Smart Port Clusters, as well as to the integration of cutting-edge technologies into transport systems. The results can inform the formulation of a National Strategy for the development of Smart Ports and Smart Port Clusters, including legislative initiatives, funding for investment projects, and the development of international partnerships. The implementation of Smart Port Clusters will reduce operational costs, increase productivity, and lower environmental impact, thereby contributing to the development of Ukraine's economy, particularly in the port sector.

Key words: Smart Ports, Port Clusters, Intellectual Port Clusters, Smart Port Clusters, Port Digitalization, Port Operations Automation, Artificial Intelligence In Ports, Big Data In Transportation, Internet Of Things (Iot) In Ports, Green Technologies In Ports, Port Development Strategies, Freight Transportation.

Formulation of the problem. The creation of SMART PORT Clusters has become a key direction in the transformation of the global transport system, which determines the competitiveness of port complexes in the XXI century. The integration of digital technologies, artificial intelligence, the Internet

of Things (IoT), and automated transport systems contributes to improving the efficiency of port operations, optimizing international freight flows, and reducing the carbon footprint. Specifically, SMART PORT Clusters ensure higher cargo processing speeds, better interaction among participants in

logistics chains, and improved environmental conditions in port areas.

In this regard, there is an important scientific task to develop effective models and strategies for implementing SMART PORT Clusters in the global transport infrastructure. Contemporary scientific research confirms that the formation of such clusters allows ports to adapt to changes in global trade, ensuring a high level of resilience to crises and geoeconomic challenges. This not only promotes economic growth but also strengthens the geopolitical and economic stability of countries that use such cluster models to integrate their ports into international transport networks [1, p. 361-362; 2].

The transformation of the port industry through the creation and development of SMART PORT Clusters is an essential component of modern transport system development strategies [1, p. 361-362; 2]. In the context of post-war reconstruction of Ukrainian ports, this task becomes particularly relevant, as intelligent technologies can become the foundation not only for economic recovery but also for infrastructure rehabilitation. Increasing the technological efficiency of ports and adapting them to the latest international standards is essential for the recovery and integration of Ukrainian ports into global transport networks.

Analysis of recent research and publications.

The development of SMART PORT Clusters is focused on integrating digital technologies, automating port processes, and applying artificial intelligence to optimize the functioning of ports within global transport networks. In work [1, p. 361-362], the SMART PORT Cluster concept is presented as an innovative approach to the development of port infrastructure and its integration into the global transport system. The key advantages of this model are identified, including enhanced efficiency, environmental safety, and the competitiveness of port complexes.

The publication [2] explores the prospects of implementing SMART clusters in Ukraine's port system as a tool for modernizing maritime transport hubs in line with global trends in digitalization, automation, and environmental sustainability. The key structural elements of port SMART clusters are defined, including digital management platforms, automated transport corridors, environmental monitoring systems, multimodal integration, and cybersecurity measures. The strategic role of SMART clusters in strengthening the competitiveness of Ukrainian ports, their integration into the global economy, and the creation of a sustainable transport system is substantiated, taking into account post-war challenges and the need for critical infrastructure recovery.

The concept of SMART PORTS is the subject of numerous scientific studies that analyze global trends in the implementation of intelligent technologies in port infrastructure. For instance, the article [3, p. 81-90] examines the main stages of development of this concept and the practical aspects of its implementation in international port practice. Works [4, p. 82-85; 5, p. 63-72] provide a detailed analysis of modern technologies and their implementation in leading ports worldwide.

The research [6, p. 28] emphasizes the significance of the SMART PORT concept in the context of Industry 4.0. Specifically, the possibilities of using the Internet of Things, cloud computing, and cybersecurity measures in maritime operations are discussed, contributing to the enhanced efficiency of port management.

Publication [7, p. 654-662] is dedicated to the automation of technological processes within the development of green and SMART ports. Using the example of the Wismar seaport, it shows how the digitalization of operations can effectively combine with environmental initiatives, reducing the carbon footprint and optimizing transport flows.

The article [8, p. 5-22] addresses the issue of standardizing digital services within the «Port of the Future» concept, particularly analyzing relevant technologies and information systems that ensure the unification of digital interactions between ports.

Thus, contemporary scientific research confirms the strategic importance of SMART PORTS and SMART PORT Clusters as key elements of the global transport system. They contribute to enhancing the competitiveness of ports, adapting to the challenges of international trade, reducing environmental impact, and ensuring the resilience of port infrastructure in crisis situations.

Task statement. The aim of the research is to substantiate the strategic role of SMART PORT Clusters in the global transport system, assess their development prospects, and explore the possibilities of their integration into Ukraine's port infrastructure, considering current technological trends and post-war recovery challenges.

To achieve the set goal, the following tasks have been defined:

1. To systematize the conceptual approaches to the formation of SMART PORT Clusters, defining their key structural elements, technological foundation, and principles of operation.

2. To analyze global trends in the development of SMART PORT Clusters and their impact on the efficiency and resilience of port systems.

3. To define the role of SMART PORT Clusters in enhancing the competitiveness of ports, their integration into international transport networks, and their adaptation to changes in the global economy.

4. To substantiate the prospects for the implementation of SMART PORT Clusters in Ukraine, taking into account post-war challenges, the need for modernization of critical infrastructure, and ensuring its sustainable development in the context of digitalization and ecological transformation.

Outline of the main material of the study.

The modern port industry is undergoing significant changes driven by global digitalization, automation, and the need to enhance the efficiency of transport processes. In this context, the concept of SMART PORT Clusters becomes not only a logical stage in the evolution of ports but also a strategic tool for adapting to the new challenges of the global transport infrastructure.

The formation of Intelligent Port Clusters reflects a shift in the approach to organizing port activities. Instead of the traditional model of individual terminals and transport hubs, an integrated digital ecosystem emerges, based on the use of artificial intelligence, big data analytics, automated management systems, and real-time interaction.

Next, we will sequentially examine the key aspects of the creation of Intelligent Port Clusters, their role in enhancing port operations' efficiency, as well as global trends in the development of this concept. Additionally, we will analyze the integration of such clusters into international transport networks, particularly in the context of post-war reconstruction of Ukraine's port infrastructure, the need for modernization of critical infrastructure, and adaptation to modern technological requirements.

1. The Creation of Intelligent Port Clusters (Smart Port Clusters) as a New Stage in the Evolution of the Port Industry.

The development of the global port industry is on the verge of a technological breakthrough driven by global digitalization, automation, and the growth of maritime transport volumes. Intelligent Port Clusters are creating a new level of port operations, where digital technologies, artificial intelligence (AI), big data and automated systems interact within a unified innovative ecosystem [1, p. 361-362; 2].

An Intelligent Port Cluster is a complex dynamic system that evolves in real-time through the integration of advanced digital, technological, and managerial solutions. It creates an innovative environment for optimizing technological processes, increasing productivity, reducing operational costs, ensuring

environmental sustainability, and enabling effective interaction among all cluster participants, thus facilitating their integration into global transport networks.

The composition of an Intelligent Port Cluster includes:

- port infrastructure (terminals, docks, warehouses, transshipment complexes, energy and environmental facilities, renewable energy objects);
- transport hubs (ports, railway stations, etc.);
- communication routes (motorways, railway tracks, shipping lanes, intra-port routes for cargo and vehicle movements);
- digital management platforms (systems for vessel arrival monitoring, automated dispatch management, predictive analytics, optimization of port operations);
- transport operators (shipping companies, freight forwarding enterprises, customs and regulatory authorities, insurance companies);
- information and technological services (cloud computing, blockchain platforms, Internet of Things (IoT) systems, digital twins of port infrastructure, artificial intelligence (AI), autonomous systems, cargo flow and vessel arrival management systems).

These elements interact in real-time, enabling the optimization of cargo flows, reducing vessel downtime, increasing productivity and minimizing human error.

Key components of Smart Port Clusters:

- digital management technologies – the implementation of automated dispatch systems, vessel arrival management, terminal performance monitoring;
- automated cargo handling systems – robotic cranes, autonomous loaders, «smart» conveyors, unmanned ground and water transport vehicles;
- predictive analytics technologies – the use of AI and Big Data for predicting peak loads, allocating port resources and managing risks;
- decentralized data exchange platforms – the integration of blockchain solutions for secure and transparent data exchange between ports, operators, and regulators [5, p. 69-70].

Intelligent Port Clusters enable the creation of a global digital transport network, where information about each cargo, vessel, and operation is available in real-time. This opens up new opportunities for continuous improvement of technological processes and operations, automation of document flow, reduction of operational costs, and lowering of environmental impact.

Thus, an Intelligent Port Cluster is not just a high-tech system for managing port operations but a developed innovation ecosystem, where the interaction of

infrastructure objects, digital platforms, and business entities creates a new level of sustainable and efficient port operations within the global transport system.

Smart Port Clusters establish a new paradigm for port development, where traditional port management models [9] are replaced by models based on the integration of interconnected intelligent and high-tech solutions. This not only enhances the efficiency of port production activities but also enables ports to become hubs of data and innovation, allowing them to not just respond to changes but actively predict them, adapt to future challenges, and set new trends in the global transport ecosystem.

2. Global Trends in the Development of Smart Port Clusters.

The global transport system is undergoing a massive transformation, with key driving forces being digitalization, automation, and sustainable development. In the context of rising global trade, increasing cargo flows, and the need to enhance port operational efficiency, Smart Port Clusters are becoming the foundation for the future development of port infrastructure.

Global Megatrends in the Development of Smart Port Clusters:

- automation and autonomous technologies. The active development of autonomous shipping, robotic terminals, and the use of drones for monitoring and technical diagnostics of port infrastructure significantly reduces costs and accelerates cargo handling. In the ports of Singapore and Rotterdam, autonomous container ships and autonomous port cranes are already being tested and operated [3, p. 78-83];

- artificial intelligence (AI) and Big Data. Intelligent analytical systems based on AI are used for predicting peak loads, optimizing terminal operations, managing vessel calls, and reducing idle times. In the port of Hamburg, AI algorithms, by optimizing resource allocation, allow reducing the average container transshipment time by 30 %;

- blockchain and data transparency. Decentralized technologies ensure instant and secure data exchange between all participants in the Port Cluster, from shipping companies to customs authorities. For instance, the «TradeLens» system, developed by «Maersk» and «IBM», ensures transparent supply chain management, reducing bureaucratic barriers and accelerating customs clearance [5, p. 69-70]. This system is already used by over 300 ports worldwide;

- green port infrastructure. Environmental sustainability is becoming a priority for leading ports. The implementation of renewable energy sources, electric handling equipment, and emission reduc-

tion systems significantly reduces the environmental impact. For example, the Port of Los Angeles plans to become fully «green» by 2030;

- 5G and the internet of things (IoT). 5G technology ensures instant data exchange between all components of the port ecosystem, while IoT sensors enable real-time tracking of cargo movement, container conditions, and equipment performance [4, p. 85].

The global leaders in the development of Smart Port Clusters today are recognized as:

Singapore – a global leader in Smart Ports, where the «Next Generation Port» concept is implemented, involving full digitalization and automation of the port.

Rotterdam – a port that actively integrates blockchain, AI, and autonomous technologies to enhance terminal efficiency.

Hamburg – an example of a «Smart Port» with integrated digital platforms for real-time cargo flow management.

Shanghai – the world's largest container port, which employs robotic terminals and AI analytics to increase productivity [5, p. 71].

The development of Smart Port Clusters has become an integral part of the global integration of maritime transport, forming a unified digital infrastructure with continuous data exchange. Amid the dynamic growth of international trade and rapid transformations in the global economic environment, Smart Port Clusters ensure flexibility, efficiency and sustainable development of the global transport system.

3. The Role of Smart Port Clusters in the Global Transport Ecosystem.

Smart Port Clusters play a crucial role in enhancing the efficiency of the global transport system, contributing to the optimization of cargo flows, reducing turnaround times, and lowering transportation costs. As stated in the publication [3, p. 80-93], the creation of unified digital platforms for managing port processes ensures a new level of coordination between all participants in the transport chain.

The main advantages of Smart Port Clusters for the global transport system:

- acceleration of cargo handling and reduction of delays. The implementation of automated and robotic solutions in the world's largest ports allows reducing the average processing time for container ships by 30-50 %. For example, in the Port of Rotterdam, the use of a Digital Twin and AI analytics system has reduced vessel downtime, while in the Port of Shanghai, robotic cranes have decreased the container handling time from 20 to 7 minutes;

- reduction of transportation costs and increased transparency. Blockchain and digital platform technologies, such as «TradeLens», facilitate efficient document flow and minimize administrative expenses. According to research, the use of blockchain can reduce logistics costs by 15 % by eliminating unnecessary intermediary operations and speeding up customs clearance;

- environmental efficiency and reduction of CO₂ emissions. Smart Port Clusters play an important role in the decarbonization of the global transport system. As noted in the paper [3], integrating green energy, using electric handling equipment, and traffic forecasting analytics can reduce CO₂ emissions in ports by 20-40 %. For example, the Port of Long Beach is actively implementing «Shore Power Systems» that allow vessels to connect to onshore power instead of operating on diesel generators [4];

- global synchronization of transport flows. Smart Port Clusters contribute to the global coordination of maritime, rail, and road cargo flows, providing a unified digital system for managing shipments. Specifically, the Port of Hamburg has developed the «Smart Logistics Hub» system, which synchronizes vessel arrival times, rail terminal operations, and the distribution of goods among regional logistics centers [5].

Thus, the formation of Smart Port Clusters opens a new era in the development of the transport industry. As stated in works [1, 2], Smart Port Clusters will become the foundation for creating a global digital transport network, integrating maritime, road, rail, and air transportation into a single system.

4. Smart Port Clusters as a strategic direction for post-war reconstruction of the national transport system and its integration into the global transport network.

The war has significantly altered the logic of the maritime industry, requiring not only the physical reconstruction of infrastructure but also a rethinking of approaches to management, security, and technological development of port complexes.

Considering the new challenges, the key strategic directions for Ukraine include:

- reconstruction of ports with modern digital technologies. The rebuilding of port terminals should be based not only on physical reconstruction but also on the implementation of innovative digital solutions to enhance efficiency. In particular, this includes intelligent automated cargo flow management systems, artificial intelligence, and IoT solutions, which are already actively used in leading global ports such as Singapore and Rotterdam [4];

- development of multimodal transportation. Strengthening the connections between maritime, river, rail, and road transport will contribute to diversifying transport routes and enhancing supply chain resilience [10];

- creation of safe transport corridors and shipping routes. To ensure the safety and efficiency of transport, satellite and drone monitoring systems should be implemented to identify hazardous areas, and blockchain systems should be launched for route verification and risk management, similar to the Maersk-IBM TradeLens platform [5];

- expanding Ukraine's integration into international transport corridors. Post-war Ukraine will have a unique opportunity to strengthen its role in global transport networks:

- a) Caspian-Black Sea route of the New Silk Road – including Ukrainian ports in this route will facilitate the recovery of exports through Georgia, Azerbaijan, and Kazakhstan;

- b) expansion of cooperation with the EU – the creation of digital transport platforms for integrating Ukrainian ports into the Trans-European Transport Network (TEN-T) [3];

- creating a safe environment for investment. Post-war recovery requires attracting international investors and partners. This will be possible through the implementation of transparent port cluster management mechanisms and integration into European transport networks [4]. The development of Smart Port Clusters could become a priority for international financial support, particularly through:

- a) EU and World Bank funds, which are already financing infrastructure projects in Ukraine;

- b) private investments through the involvement of leading port operators (A.P. Moller-Maersk, DP World, Hutchison Ports) in the creation of innovative container terminals based in Ukrainian ports;

- Environmental modernization. The restoration of Ukraine's port infrastructure must comply with the principles of «green» development, including the use of renewable energy and environmentally friendly technologies in the transport sector [5].

Conclusions.

1. The creation of Smart Ports and Smart Port Clusters is an important step in the development of global port infrastructure, achieved through the integration of digital technologies, automation, and the use of advanced artificial intelligence systems, big data, and the Internet of Things. This enhances efficiency, ensures the flexibility of port operations, optimizes cargo flows, reduces operational costs, and minimizes the environmental impact of ports. Such

changes create the foundation for stable development and integration of ports into global transport networks.

2. Smart Port Clusters contribute to the development of the global transport system by significantly reducing cargo handling times, lowering transportation costs, and improving transparency in data exchange processes. The use of technologies such as blockchain, robotic systems, and autonomous cargo handling equipment improves coordination between all participants in the supply chain and increases the efficiency of international trade.

3. Given global environmental challenges, Smart Port Clusters play a significant role in reducing CO₂ emissions and ensuring the environmental efficiency of port operations. The integration of renewable energy sources, electric cargo handling equipment, and the application of green technologies help reduce the environmental impact of ports on the surrounding environment.

4. The implementation of Smart Ports and Smart Port Clusters concepts will not only contribute to the recovery of Ukraine's ports but will also create a competitive, technologically advanced transport system integrated into the global market. Ukraine has all the prerequisites to become a regional leader in the

field of smart port technologies and modern transport strategies in the post-war perspective.

Further research in the highlighted direction should:

- include a comprehensive assessment of the impact of Smart Port Clusters on the economic efficiency of port operations, considering not only operational costs but also their influence on the growth of transit traffic, reduction in cargo handling time, and improvement in the efficiency of port capacity utilization;

- study the environmental impact of Smart Port Clusters on the surrounding environment, particularly on the condition of port areas, including the analysis of the possibility of reducing harmful gas emissions, preserving biodiversity, and implementing environmental monitoring systems;

- focus on the development of a National Strategy for the development of Smart Ports and Smart Port Clusters in Ukraine. This would include the creation of legislative initiatives, ensuring the financing of investment projects, and the development of international partnerships for integrating Ukrainian ports into global intelligent transport networks, which will allow attracting additional investments and advanced technologies.

Bibliography:

1. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Smart Port Clusters: інноваційний підхід до розвитку портової інфраструктури і глобальної транспортної мережі. Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. К.: НТУ, 2025. Вип. 81. 954 с. DOI: 10.33744/2786-6459-2025-81.

2. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Концепція Smart-кластерів у портах України. Marine Power Plants & Operation, MPP&O-2025: матеріали V Міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ (Одеса, 04 березня 2025 р.) / Одеський національний морський університет. Одеса, ОНМУ, 2025. URL: <https://2025.depas.od.ua> (дата звернення: 23.11.2025).

3. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. «Smart Ports» як інноваційний вектор технологічної трансформації та цифровізації портів: від ідеї до концепції та практичної реалізації. *Розвиток транспорту. Транспортні технології (за видами)*. 2024. № 4(23). С. 77–95. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.4-23.07>.

4. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю., Магамадов О.Р. Поняття «Smart Port» у контексті глобальних тенденцій інтеграції інтелектуальних транспортних та інформаційних технологій у портовій індустрії. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35(74), № 5. С. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14>.

5. Kyrylova O., Kyrylova V., Mahamadov O., Romakh V. Smart port: the latest technologies and international experience in their implementation. *Transport Development*. 2024. № 2(21). P. 62–74. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.06.

6. Paraskevas A., Madas M., Zeimpekis V., Fouskas K. Smart Ports in Industry 4.0: A Systematic Literature Review. *Logistics*. 2024. Vol. 8, № 1. P. 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics8010028>.

7. Philipp R., et al. Towards Green and Smart Seaports: Renewable Energy and Automation Technologies for Bulk Cargo Loading Operations. *Environmental and Climate Technologies*. 2021. Vol. 25, № 1. P. 650–665. DOI: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2021-0049>.

8. Pagano P., Antonelli S., Tardo A. C-Ports: A Proposal for a Comprehensive Standardization and Implementation Plan of Digital Services Offered by the «Port of the Future». *Computers in Industry*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103556>.

9. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Класичні системи управління портами та їх концептуальні моделі. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2023. №24. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24>.

10. Kyrylova O.V., Kyrylova V.Y. Multimodal transport in national legislation and international context. *Transport Development*. 2024. № 3(22). P. 106–122. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.07>.

Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ПОРТОВІ КЛАСТЕРИ ЯК СУЧАСНИЙ ІНСТРУМЕНТ РОЗВИТКУ ГЛОБАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТРАНСПОРТНИХ КОМУНІКАЦІЙ І СТРАТЕГІЧНИЙ ВЕКТОР ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ПОРТОВОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ

Стаття досліджує Інтелектуальні Портіві Кластери як сучасний інструмент розвитку глобальної транспортної системи та стратегічний вектор післявоєнного відновлення портової інфраструктури України. Метою роботи є обґрунтування стратегічної ролі Інтелектуальних Портіві Кластерів у глобальній транспортній мережі, оцінка перспектив їх розвитку та інтеграції в портову інфраструктуру України з урахуванням сучасних технологічних тенденцій і викликів післявоєнного відновлення. Основна увага приділяється аналізу інноваційних технологій, таких як цифровізація, автоматизація та інтеграція цифрових платформ, що сприяють оптимізації портових операцій, підвищенню ефективності управління вантажопотоками та забезпеченню екологічної стійкості портів. Окремо розглянуто впровадження технологій штучного інтелекту (AI), великих даних (Big Data), Інтернету речей (IoT), блокчейну та цифрових двійників для інтеграції й оптимізації транспортних процесів у реальному часі. Проаналізовано світові тенденції розвитку Інтелектуальних Портіві Кластерів, зокрема використання автономних суден, роботизованих перевантажувальних механізмів та автоматизованих диспетчерських систем. Представлено кейси провідних портів світу, таких як Роттердам, Сінгапур і Гамбург, які демонструють ефективність цифрових технологій у підвищенні конкурентоспроможності портових операцій. Стаття також акцентує увагу на потенціалі Інтелектуальних Портіві Кластерів для післявоєнного відновлення української портової інфраструктури. Визначено, що впровадження сучасних цифрових технологій може значно прискорити відновлення портів, підвищити їх конкурентоспроможність на міжнародному рівні та сприяти залученню інвестицій. Викладено пропозиції щодо інтеграції українських портів у глобальні транспортні мережі через використання інтелектуальних кластерних моделей. Результати дослідження показують, що Інтелектуальні Портіві Кластери здатні суттєво підвищити ефективність портових операцій, знижуючи операційні витрати, оптимізуючи вантажопотоки та зменшуючи екологічне навантаження. Новизна роботи полягає в дослідженні потенціалу таких кластерів для відновлення економіки України через їх інтеграцію в глобальні технологічні екосистеми. Таким чином, стаття підтверджує важливість Інтелектуальних Портіві Кластерів як ключового інструменту модернізації транспортної інфраструктури, підвищення стійкості портів та інтеграції їх у світову транспортну екосистему. Запропоновані рекомендації можуть бути використані при розробці Національних стратегій розвитку портової галузі України в післявоєнний період. Дослідження є важливим внеском у розвиток Концепцій Розумних Портів (Smart Ports) та Інтелектуальних Портіві Кластерів (Smart Port Clusters), а також у процес інтеграції новітніх технологій у транспортні системи. Результати роботи можуть бути використані для розробки Національної стратегії розвитку Розумних Портів та Інтелектуальних Портіві Кластерів, яка передбачатиме законодавчі ініціативи, фінансування інвестиційних проєктів та розвиток міжнародних партнерств. Впровадження Інтелектуальних Портіві Кластерів дозволить зменшити операційні витрати, підвищити продуктивність і знизити екологічні витрати, сприяючи розвитку економіки України, зокрема портового сектора.

Ключові слова: smart-порти, портіві кластери, інтелектуальні портіві кластери, smart port clusters, цифровізація портів, автоматизація портових операцій, штучний інтелект у портах, великі дані на транспорті, інтернет речей (iot) у портах, зелені технології у портах, стратегії розвитку портів, вантажні перевезення.

Дата надходження статті: 14.11.2025

Дата прийняття статті: 01.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Кисельов В.Б.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Лановий О.Т.

Національний транспортний університет

Кошарний О.М.

Національний транспортний університет

АНАЛІЗ І БІЗНЕС-ПЛАНУВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ «КИЇВ – ОДЕСА» НА ПЛАТНІЙ ТА БЕЗОПЛАТНІЙ ОСНОВІ

В статті 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.

Метою цього дослідження є аналіз і бізнес-планування прийняття рішення при визначенні рентабельності експлуатації та окупності об'єкту державно-приватного партнерства.

Основними задачами, що необхідно вирішити при виконанні цього дослідження, є наступні: аналіз капітальних (інвестиційних), поточних та адміністративних витрат при розрахунку максимального розміру плати за проїзд; обґрунтування оптимального розподілу ризиків між концесієдавцем і концесіонером; аналіз існуючих способів залучення інвестицій (кредити, випуск цінних паперів, вільні кошти юридичних і фізичних осіб, власні кошти тощо) економіко-правове обґрунтування оптимального поєднання цих способів на будівництво автомобільних доріг на умовах концесії; розробка програмних засобів розрахунку показників ефективності будівництва концесійних автомобільних доріг з урахуванням вартості грошей у часі та ризиків, що можуть виникати при реалізації таких проектів; розробка методичних рекомендацій по розрахунку рентабельності експлуатації та окупності концесійних та платних автомобільних доріг і розрахунок показників ефективності будівництва на умовах концесії автомобільної дороги.

Необхідність будівництва дороги повинна бути обумовлена, у першу чергу, соціально-економічною доцільністю незалежно від джерел фінансування будівництва. Така доцільність може бути викликана необхідністю існування дороги з метою розвитку економічних відношень усередині країни, збільшення внутрішнього і зовнішнього товарообігу, розвитку економічних відносин між регіонами, пожвавлення економіки окремих регіонів, зниження транспортних витрат при виробництві та транспортуванні продукції підприємств, а також відсутністю потенційних засобів рішення поставлених цілей за рахунок уже існуючих доріг. Однією з основних цілей пропонування участі у будівництві та експлуатації автомобільних доріг приватних інвесторів, є поліпшення якості обслуговування їх користувачів. Таке поліпшення доцільно в тому випадку, якщо існуючий рівень обслуговування (за умов недостатнього бюджетного фінансування) не може задовольнити потреб користувачів, що пояснюється низькою ефективністю управління дорогою з боку державних підприємств і організацій.

Результати статті можна використовувати при розробці інвестиційних проектів автомобільних доріг, а також визначення плати за проїзд після реконструкції автомобільної дороги Київ – Одеса.

Ключові слова: автомобільна дорога, плата за проїзд, концесія, інвестиційні проекти, державно-приватне партнерство, бізнес-планування.

Постановка проблеми. Унаслідок недостатнього фінансування мережі автомобільних доріг загального користування України та їх незадо-

вільного стану щорічно економіка держави недоотримає близько 10% ВВП. В умовах фінансової скрути, в яких опинилася більшість підприємств,

що будують, ремонтують та утримують автомобільні дороги загального користування, виникає потреба пошуку альтернативних джерел фінансування дорожнього господарства України.

Важливим фактором сприяння залучення приватного вітчизняного та іноземного капіталу є досконала нормативно-правова база, яка повинна забезпечити чіткі та неупереджені правила поведінки держави і приватного інвестора, а також відповідні гарантії інвестиційної діяльності в Україні. Концесійні автомобільні дороги широко поширені у світовій практиці. Застосування плати за проїзд автомобільними дорогами закордоном почалося у 1950-х роках. В Україні ця діяльність тільки може розпочатися. У 2010 р. був прийнятий Верховною Радою України Закон України «Про державно-приватне партнерство».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначення об'єктів концесії на будівництво та експлуатацію автомобільних доріг загального користування здійснюється на підставі державної стратегії розвитку мережі автомобільних доріг з урахуванням економічної доцільності надання їх у концесію та згідно з нормами і правилами проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг [1, 2].

Пропозиції щодо визначення об'єктів концесії на будівництво та експлуатацію автомобільних доріг загального користування подаються концесієдавцю Верховною Радою Автономної Республіки Крим, Радою міністрів Автономної Республіки Крим, обласними, районними та Севастопольською міською радами, відповідними держадміністраціями

Постановка завдання. Мета дослідження полягає в прийнятті рішення щодо визначення рентабельності експлуатації та окупності автомобільної дороги «Київ – Одеса» як об'єкту державно-приватного партнерства (зокрема, за умов можливого введення плати за проїзд після її реконструкції).

Виклад основного матеріалу. Проведений аналіз показує, що історично сформована в нашій країні недооцінка ролі автомобільних доріг має вкрай негативні наслідки в економічній та соціальній сферах.

Стан і рівень розвитку мережі автомобільних доріг в Україні, стали традиційною національною проблемою. Без надійно працюючої, економічної, безпечної й екологічно чистої мережі автомобільних доріг, орієнтованої на інтереси користувачів та економіки країни неможливі процеси радикальних реформ економічної та соціальної сфери країни [3].

Економічна історія каже, що періоди зростання, як правило, приходять у результаті значних інвестицій у сполученні із потужним зростанням ефективності. Для дорожнього господарства найважливішим є підтримання на належному рівні існуючої мережі автомобільних доріг. Для ефективності її функціонування потрібні інвестиції, пов'язані з будівництвом автомобільних магістралей по напрямках міжнародних транспортних коридорів [4].

Автомобільним дорогам України необхідно приділяти особливу увагу, усвідомлюючи їх важливу рису – транзитний характер території нашої країни, визначений історією. Без надійно працюючої, економічної, безпечної й екологічно чистої мережі автомобільних доріг, орієнтованої на інтереси користувачів і економіки країни, будуть неможливі процеси радикальних змін в економічній та соціальній сферах, формування ринкових відносин в економіці України [3, 4].

За рівнем розвитку автомобільного транспорту та мережі автомобільних доріг Україна сьогодні значно відстає від розвинутих країн. Частка вантажообігу, виконуваного автомобільним транспортом, непропорційно мала – майже в 20 разів менше, ніж у Франції, у 3–5 разів менше, ніж у США, Німеччині, Канаді та інших країнах світу. Середня дальність поїздки на автомобілі в Україні складає усього 39 км, що в 2–3 рази менше, ніж у США, Канаді, Франції та інших близьких по розмірах території країн. Аналізуючи довжину мережі доріг загального користування України слід відзначити, що забезпеченість держави поза-міськими автомобільними дорогами загального користування значно менше, ніж у більшості європейських країн [8].

Незбалансованість розвитку видів транспорту та транспортної інфраструктури значно знизили ефективність роботи єдиної транспортної системи країни. При цьому, незважаючи на економічну ситуацію, що склалася в Україні, різко збільшилися темпи росту автомобільного парку, який за останні 3 роки зріс більше ніж на 30%, що призвело до збільшення інтенсивності руху на автомобільних магістралях. Обсяги міжнародних автомобільних перевезень на західних напрямках за останні два роки збільшилися на 24%. Загалом кількість зареєстрованих транспортних засобів в Україні перевищила 20 млн автомобілів.

Розглянемо ситуацію, що історично склалася в нульових роках двадцять першого століття. Тодішнім міністром транспорту було прийняте рішення про реконструкцію з подальшим пере-

веденням у ранг платних автомобільної дороги Київ – Одеса. Автомобільна дорога Київ – Одеса на ділянці Київ – Жашків та Червонознам'янка – Одеса була реконструйована за параметрами дороги категорії 1-б з чотирма смугами руху. На ділянці Жашків – Червонознам'янка довжиною 252,2 км, за винятком 26 км, дорога мала дві смуги руху, що створює значні ускладнення в організації дорожнього руху в цілому автомобільною магістраллю Київ – Одеса. Необхідність реконструкції ділянки від Жашкова до Червонознам'янки була продиктована потребою розвитку зростаючих транспортних зв'язків як регіонів України між собою, так і України з країнами Чорноморського та Середземноморського басейнів.

Напрямок траси дороги на ділянці Жашків – Червонознам'янка в ТЕО Укодіпродору визначався на основі розгляду запропонованих трьох варіантів вибору напрямків. За результатами техніко-економічних порівнянь було рекомендовано варіант з максимальним використанням існуючої автомобільної дороги та, відповідно, смуги відведення. Останнє дало можливість зменшити відведення додаткових площ орних земель. Зазначені обставини обумовили прийняття рішення про необхідність реконструкції ділянки дороги Жашків – Червонознам'янка.

Через те, що на ділянці автомобільної дороги Жашків – Червонознам'янка був передбачений платний проїзд автомобільного транспорту, на дев'яти транспортних розв'язках намічені пункти збору плати за проїзд.

Відповідно до Закону України «Про реконструкцію та експлуатацію на платній основі автомобільної дороги Київ – Одеса на ділянці від Жашкова до Червонознам'янки» в ТЕО було передбачено будівництво альтернативної безоплатної автомобільної дороги. Довжина траси альтернативної дороги становить 274 км. Параметри дороги намічені по III категорії (ширина земляного полотна 12,0 м, проїзної частини 7,0 м). Довжиною дороги у 100 км трасу було намічено існуючими дорогами, які потрібно реконструювати. Альтернативна дорога має пройти через 18 населених пунктів; передбачається забезпечити місцеві транспортні зв'язки [10–15].

Згідно з ТЕО розрахункова вартість реконструкції дороги становила 2965671,403 тис. грн. Крім того, визначена розрахункова вартість будівництва альтернативного проїзду, яка складала 1476800,0 тис. грн. термін окупності капіталовкладень в ТЕО дорівнював 16 рокам. Але слід зазначити, що термін окупності визначався,

по-перше, з урахуванням доходів від придорожньої комерційної інфраструктури, що є неприпустимим, а по-друге, не був використаний принцип приведення грошових потоків до сьогоденного дня з урахуванням дисконтування їх у часі.

Переорієнтація автомобільної дороги Київ – Одеса на ділянці Жашків – Червонознам'янка після її реконструкції на платну основу обмежує права громадян на вільне пересування, що відповідними статтями гарантує Конституція України, оскільки за проїзд автомобільною дорогою доведеться платити і за ті її частини, в які раніше вже були вкладені значні бюджетні кошти.

Автомобільна дорога Київ – Одеса споруджувалася у 1950–60 рр. по надзвичайно вдалому напрямку траси – майже по прямій з півночі на південь. Окрім того, дві значні за довжиною ділянки дороги (Київ – Жашків у Київській обл. та Одеса – Червонознам'янка в Одеській обл.) вже було раніше реконструйовано по категорії I-б. Тобто, на момент прийняття рішення про реконструкцію дороги на ділянці м. Жашків – с. Червонознам'янка (траса – пряма лінія), майже половина довжини автомобільної дороги Київ – Одеса була в значно гіршому стані по умовах руху, хоча у кращому варіанті за напрямком руху.

На момент прийняття рішення в Україні існувало у повному обсязі законодавче підґрунтя щодо впровадження будівництва та подальшої експлуатації автомобільної дороги на концесійній основі у відповідності із Законом України «Про концесії на будівництво та експлуатацію автомобільних доріг». Відповідно до цього потрібно було б прийняти рішення про будівництво дороги на зазначеній ділянці за новим напрямком (варіанти II та III ТЕО). Після чого потреба у будівництві альтернативної дороги (безоплатного проїзду) була б недоречною через те, що по новому напрямку можна було б запровадити плату за проїзд, а стару ділянку дороги використовувати як альтернативну з безоплатним проїздом.

Було прийнято таке рішення щодо реконструкції автомобільної дороги Київ – Одеса на ділянці від м. Жашків до с. Червонознам'янка. Для того, щоб зробити платним проїзд цієї діляною у 2003 р. Верховна Рада України прийняла за поданням Кабінету Міністрів України Закон України «Про реконструкцію та експлуатацію на платній основі автомобільної дороги Київ – Одеса на ділянці від Жашкова до Червонознам'янки», де визначаються особливості реконструкції та експлуатації на платній основі автомобільної дороги Київ – Одеса на ділянці від Жашкова

до Червонознам'янки в порядку експерименту в інтересах економіки України. Основними принципами реконструкції та експлуатації на платній основі автомобільної дороги є обов'язкова наявність до початку експлуатації на платній основі об'єкта реконструкції безоплатної автомобільної дороги чи окремих смуг руху вздовж об'єкта реконструкції, що знаходяться в належному для експлуатації технічному стані як альтернативного варіанта зручного проїзду транспортних засобів у напрямку Київ – Одеса на ділянці від Жашкова до Червонознам'янки та забезпечення руху в населених пунктах, розміщених вздовж об'єкта реконструкції (стаття 2 Закону України «Про реконструкцію та експлуатацію на платній основі автомобільної дороги Київ – Одеса на ділянці від Жашкова до Червонознам'янки»). Тому ТЕО було доповнено матеріалами щодо альтернативного проїзду (як окрему частину ТЕО реконструкції автомобільної дороги Київ – Одеса). Запропонований напрямок траси альтернативної автомобільної дороги намічено існуючими вулицями населених пунктів, що значно ускладнює процес будівництва і майбутньої експлуатації дороги.

Через рік Верховною радою України за поданням Кабінету Міністрів України було прийнято Закон України «Про внесення змін до Закону України «Про реконструкцію та експлуатацію на платній основі автомобільної дороги Київ – Одеса на ділянці від Жашкова до Червонознам'янки» № 1860-IV від 24.06.2004 р. Головною відзнакою цього Закону є стаття 6, яка зазначає, що «у тексті Закону слова «на ділянці від Жашкова до Червонознам'янки» слід виключити. Тобто, цим викреслюється введення плати за проїзд цією автомобільною дорогою тільки на вищезазначеній ділянці та вводиться плата за проїзд всією дорогою від Києва до Одеси [15].

Прикінцевими положеннями цього Закону (ст. 2) зазначено, що Кабінет Міністрів України має протягом 3 місяців з дня набрання чинності цим Законом «затвердити проектно-кошторисну документацію», хоча ТЕО на реконструкцію автодороги Київ – Одеса, а також альтернативну дорогу розроблялося тільки на ділянку від Жашкова до Червонознам'янки.

Плата за проїзд автомобільними дорогами України могла бути введена тільки при наявності безоплатного альтернативного проїзду. Отже, не маючи таких альтернативних маршрутів на ділянках від Києва до Жашкова, а також від Одеси до Червонознам'янки втрачається дотримання обов'язкової наявності безоплатних автомобіль-

них доріг чи окремих смуг руху вздовж об'єкта реконструкції, що знаходяться у належному для експлуатації технічному стані, як альтернативного варіанта зручного проїзду автомобілів у необхідному напрямку чим обмежуються конституційні права громадян України. Таким чином виникла правова колізія, основою якої є протиріччя, що закладені цими законодавчими актами України.

Щодо положення ст. 4 останнього з прийнятих Законів, яка зазначає, що «виконання реконструкції автомобільної дороги Київ – Одеса здійснюється у порядку експерименту в інтересах економіки України та економічного розвитку Київської, Черкаської, Кіровоградської, Миколаївської та Одеської областей із залученням кредитних коштів, у тому числі під надання державних гарантій», то останнє безпосередньо вказує на хитку позицію техніко-економічних обґрунтувань необхідності реконструкції цієї дороги з подальшим введенням плати за проїзд. А положення частини 2 цієї статті Закону, де зазначається що «відшкодування витрат, пов'язаних з виконанням боргових зобов'язань за кредитами ... здійснюється за рахунок коштів, які передбачаються в Державному бюджеті України на розвиток мережі та утримання автомобільних доріг загального користування», призводить до того, що за таких обсягів зобов'язань на утримання мережі інших автомобільних доріг загального користування фінансових ресурсів не вистачатиме, що у свою чергу призведе до остаточної руйнації існуючої мережі [15–18].

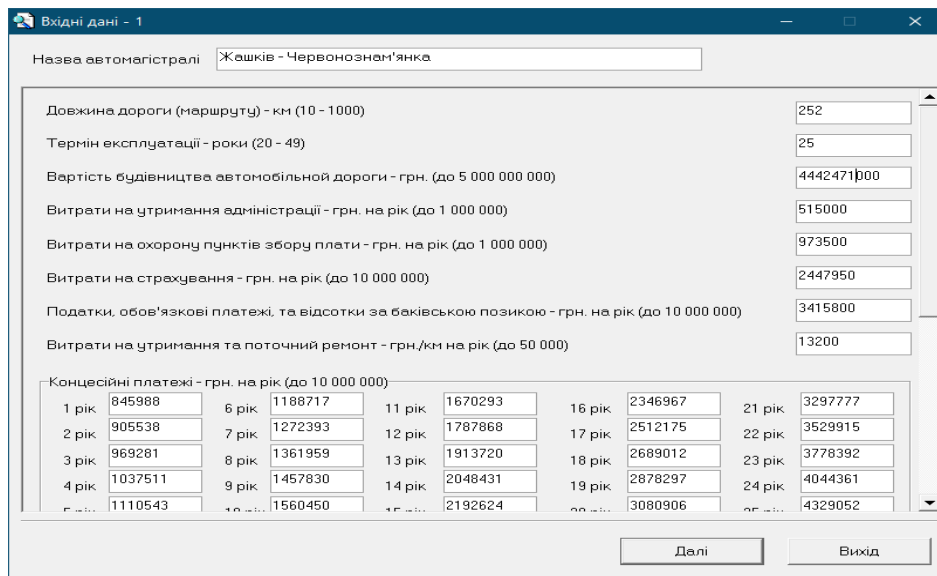
Фінансова оцінка рішення, що пропонується на відміну від запропонованого в ТЕО, базується на наступних розрахунках та аналізах:

- розрахунок інвестиційного грошового потоку проекту;
- розрахунок операційного грошового потоку проекту;
- розрахунок фінансового грошового потоку проекту;
- розрахунок та аналіз показників фінансової ефективності проекту;
- аналіз можливих схем фінансування проекту.

Усі розрахунки виконані за допомогою розробленої проф. Лановим О.Т. програми RoadPrice, на яку отриманий охоронний документ (рис. 1, 2, 3).

Таким чином розраховано три різні сальдо інвестиційного грошового потоку:

- 1 – для проекту, що передбачає реконструкцію ділянки Жашків – Червонознам'янка з реконструкцією існуючої мережі місцевих автомобільних доріг з метою упровадження альтернативного безкоштовного проїзду в напрямку Київ – Одеса;



Вхідні дані - 1

Назва автомагістралі: Жашків - Червонознам'янка

Довжина дороги (маршруту) - км (10 - 1000): 252

Термін експлуатації - роки (20 - 49): 25

Вартість будівництва автомобільної дороги - грн. (до 5 000 000 000): 4442471000

Витрати на утримання адміністрації - грн. на рік (до 1 000 000): 515000

Витрати на охорону пунктів збору плати - грн. на рік (до 1 000 000): 973500

Витрати на страхування - грн. на рік (до 10 000 000): 2447950

Податки, обов'язкові платежі, та відсотки за банківською позикою - грн. на рік (до 10 000 000): 3415800

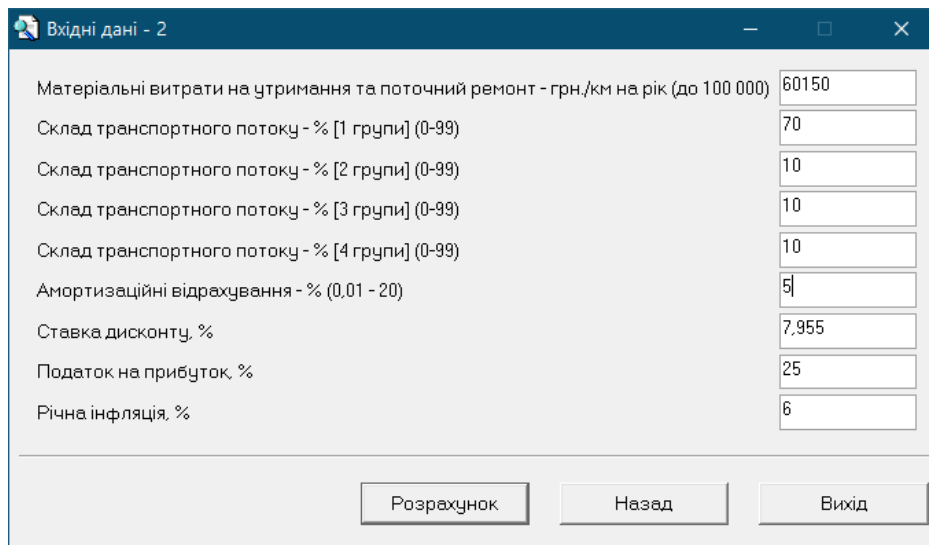
Витрати на утримання та поточний ремонт - грн./км на рік (до 50 000): 13200

Концесійні платежі - грн. на рік (до 10 000 000):

1 рік	845988	6 рік	1188717	11 рік	1670293	16 рік	2346967	21 рік	3297777
2 рік	905538	7 рік	1272393	12 рік	1787868	17 рік	2512175	22 рік	3529915
3 рік	969281	8 рік	1361959	13 рік	1913720	18 рік	2689012	23 рік	3778392
4 рік	1037511	9 рік	1457830	14 рік	2048431	19 рік	2878297	24 рік	4044361
5 рік	1110543	10 рік	1560450	15 рік	2192624	20 рік	3080906	25 рік	4329052

Далі Вихід

Рис. 1. Приклад введення вхідних даних – 1



Вхідні дані - 2

Матеріальні витрати на утримання та поточний ремонт - грн./км на рік (до 100 000): 60150

Склад транспортного потоку - % [1 групи] (0-99): 70

Склад транспортного потоку - % [2 групи] (0-99): 10

Склад транспортного потоку - % [3 групи] (0-99): 10

Склад транспортного потоку - % [4 групи] (0-99): 10

Амортизаційні відрахування - % (0,01 - 20): 5

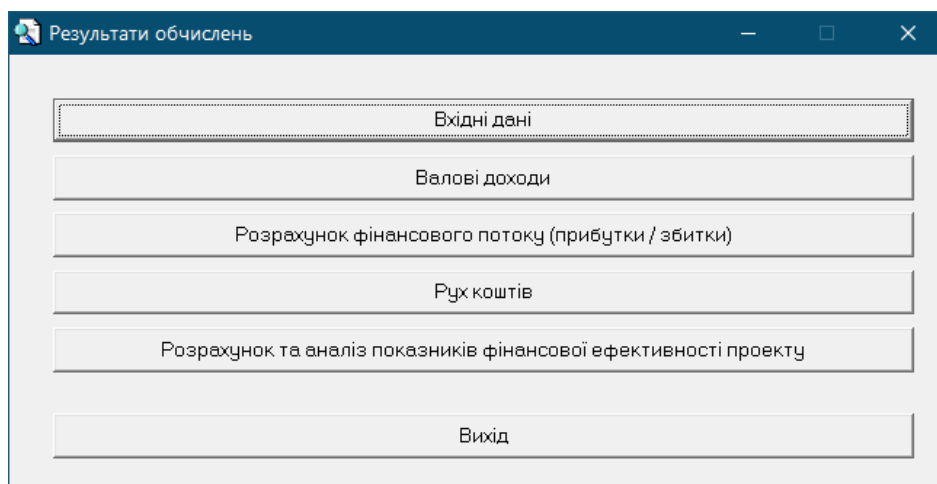
Ставка дисконту, %: 7,955

Податок на прибуток, %: 25

Річна інфляція, %: 6

Розрахунок Назад Вихід

Рис. 2. Приклад введення вхідних даних – 2



Результати обчислень

Вхідні дані
Валові доходи
Розрахунок фінансового потоку (прибутки / збитки)
Рух коштів
Розрахунок та аналіз показників фінансової ефективності проекту
Вихід

Рис. 3. Приклад результатів обчислень

Таблиця 1

№ пп.	Показник	I варіант	II варіант	III варіант
1	Інвестиції валові, грн.	4 442 471 000	4 510 000 000	2 429 248 000
2	Довжина маршруту, км	252,2	255	252,2
3	Чиста теперішня вартість проекту, грн.	3 854 701 630	5 165 270 840	3 313 823 090
4	Внутрішня норма рентабельності, %	6,69	10	10,97
5	Термін окупності, років	15	13	12
6	Дисконтований термін окупності, років	не окупається	22	18
7	Індекс рентабельності	0,87	1,14	1,36
8	Середня норма прибутку від інвестицій	1,21	2,02	2,69

2 – для проекту, що передбачає будівництво нової платної автомобільної дороги категорії 1-б, що залишає стару ділянку Жашків – Червонознам'янка для безкоштовного користування;

3 – для проекту, що передбачає ситуацію, коли вже реконструйована ділянка Жашків – Червонознам'янка, як і уся автомобільна дорога Київ – Одеса використовуватиметься як безоплатна для проїзду транспортних засобів.

Зведені фінансові показники аналізу функціонування автомобільної дороги Київ – Одеса від м. Жашків до с. Червонознам'янка (табл. 1).

Отже, потрібно визнати, що прийняте раніше рішення щодо введення плати за проїзд після реконструкції автомобільної дороги Київ – Одеса (як на ділянці від м. Жашків до с. Червонознам'янка, так і на всій її довжині) є помилковим, тому що

потреба улаштування додаткової альтернативної автодороги є дуже вартісним заходом.

Висновки. Враховуючи прагнення влади в Україні щодо вступу країни в Європейський Союз, а також незадовільний стан існуючої мережі автомобільних доріг через недостатній рівень фінансування, вважається кращим залишити дорогу Київ – Одеса безоплатною [13–18], а фінансові ресурси суспільства спрямовувати на розвиток мережі доріг у напрямку «схід – захід». Цей розрахунок був належним чином оформлений і переданий у Державну експертизу, яка передала експертний висновок у Держбуд, де він був схвалений як остаточний. На підставі останнього Постановою Кабінету Міністрів України подальшу експлуатацію реконструйованої автомобільної дороги Київ – Одеса залишили безоплатною.

Список літератури:

1. Skovajsa J., Příbyl O., Příbyl P., Ščerba M., Janota A. Evaluation of a Mobile Highway Management System at Roadwork Zones. *International Journal of 164 Engineering, Transactions B: Applications*. 2022. 35(5), pp. 900–907. DOI: 10.5829/ije.2022.35.05b.06 (SCOPUS).
2. Ambros J., Turek R., Elgner J., Krivankova Z., Valentova V. Effectiveness evaluation of section speed control in Czech Motorway work zones. *Safety*. 2020 Vol. 6(3). DOI: 10.3390/safety6030038 (SCOPUS).
3. Пересада А.А. Основи інвестиційної діяльності. К.: Літра, 1996. 342 с.
4. Суборєв В.М., Шедяков В.Є. Менеджмент у сфері інвестицій та персоналу: особливості у перехідній економіці. Харків : Бізнес Інформ, 1996. 170 с.
5. Кудіна Л.І. Методичні засади оцінки ефективності інвестиційних проектів. К.: Вид-во КМУГА, 1997. 18 с.
6. Економіка підприємства: Підручник / За ред. С.Ф. Покропивний. 2-ге вид. К.: КНЕУ, 2000. 528 с.
7. Макконелл К.Р., Брю С.Л. Економікс: Принципи, проблеми та політика / Пер. з англ. 11-го вид. К.: Ха Гар, 2000. 785 с.
8. Розробка та аналіз проектів. Вашингтон: ІЕР Світового банку 1993. 208 с. 9. Постанова КМУ від 11 грудня 1999 р. N 2293 “Про затвердження Переліку об’єктів права державної власності, які можуть надаватися в концесію”.
10. Закон України “Про концесії на будівництво та експлуатацію автомобільних доріг”.
11. Постанова КМУ від 18 січня 2000 р. N 72 “Про реєстр концесійних договорів”.
12. Постанова КМУ від 12 квітня 2000 р. N 642 “Про затвердження Положення про проведення концесійного конкурсу та укладення концесійних договорів на об’єкти права державної і комунальної власності, які надаються у концесію”.

13. Постанова КМУ від 4 жовтня 2000 р. N 1521 “Про затвердження Порядку проведення концесійного конкурсу на будівництво та експлуатацію автомобільних доріг”.
14. Постанова КМУ 12 квітня 2000 р. N 643 “Про затвердження Типового концесійного договору”.
15. Постанова КМУ 4 жовтня 2000 р. N 1519 “Про затвердження Типового концесійного договору на будівництво та експлуатацію автомобільної дороги”.
16. Постанова КМУ від 22 серпня 2000 р. N 1299 “Про затвердження Порядку встановлення максимального розміру плати за проїзд автомобільними дорогами, побудованими на умовах концесії”.
17. Постанова КМУ від 6 липня 2000 р. N 1065 “Про затвердження Порядку відшкодування за безоплатний проїзд автомобільними дорогами, побудованими на умовах концесії”.
18. Постанова КМУ від 13 липня 2000 р. N 1114 “Про затвердження Порядку визначення об’єктів концесії, концесіонерам яких можуть надаватись пільги щодо концесійних платежів, дотації, компенсації, та умов їх надання”.

Kiselyov V.B., Lanovyi O.T., Kosharnyi O.M. ANALYSIS AND BUSINESS PLANNING OF THE OPERATION OF THE “KYIV – ODESA” HIGHWAY ON A PAID AND FREE BASIS

The article examines the possibility of introducing a toll after the reconstruction of the Kyiv-Odesa highway. The research method is the methodology for determining capital (investment), current and administrative costs when calculating the maximum amount of toll for a highway.

The purpose of this study is the analysis and business planning of decision-making when determining the profitability of operation and payback of a public-private partnership object.

The main tasks that need to be solved when performing this study are the following: analysis of capital (investment), current and administrative costs when calculating the maximum amount of toll; justification of the optimal distribution of risks between the concessionaire and the concessionaire; analysis of existing methods of attracting investments (loans, issuance of securities, free funds of legal entities and individuals, own funds, etc.); economic and legal justification of the optimal combination of these methods for the construction of highways under concession; development of software tools for calculating the efficiency indicators of the construction of concession highways, taking into account the time value of money and the risks that may arise during the implementation of such projects; development of methodological recommendations for calculating the profitability of operation and payback of concession and toll highways and calculating the efficiency indicators of construction under the terms of a highway concession.

The need for road construction should be determined, first of all, by socio-economic feasibility, regardless of the sources of financing for construction. Such feasibility may be caused by the need for the existence of a road in order to develop economic relations within the country, increase internal and external trade, develop economic relations between regions, revitalize the economy of individual regions, reduce transport costs in the production and transportation of enterprise products, as well as the lack of potential means of solving the set goals at the expense of already existing roads. One of the main goals of offering participation in the construction and operation of highways to private investors is to improve the quality of service to their users. Such an improvement is advisable if the existing level of service (under conditions of insufficient budget funding) cannot satisfy the needs of users, which is explained by the low efficiency of road management by state enterprises and organizations.

The results of the article can be used in the development of investment projects for highways, as well as in determining the toll after the reconstruction of the Kyiv-Odesa highway.

Key words: highway, toll, concession, investment projects, public-private partnership, business planning.

Дата надходження статті: 11.11.2025

Дата прийняття статті: 02.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 656.135.073
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/41>

Лебідь Є.М.

Національний транспортний університет

Мазуренко О.О.

Український державний університет науки і технологій

Лебідь І.Г.

Національний транспортний університет

Лужанська Н.О.

Національний транспортний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОБОТИ ТРАНСПОРТНОГО ПІДПРИЄМСТВА ПРИ ПЛАНУВАННІ ЛОГІСТИЧНОГО ЛАНЦЮГА

Процес планування логістичного ланцюга передбачає залучення до виконання зовнішньоторговельної операції суб'єктів господарювання, які здатні забезпечити високий рівень якості обслуговування. Суттєвий вплив на ефективність функціонування логістичного ланцюга при доставці товару у міжнародному сполученні мають транспортні підприємства. Тому, важливим етапом у організації експорту товару є вибір перевізника, що здатний задовольнити потреби замовника за певними критеріями. У якості таких критеріїв, як правило, виступають тривалість та вартість доставки вантажу, а також якість обслуговування. Показники роботи транспортного підприємства відрізняються в залежності від наявного кадрового та матеріально-технічного забезпечення, а також виду вантажу, що потребує доставки. Відмінності у вимогах до перевезення генеральних, небезпечних та негабаритних вантажів зумовлюють виконання різного набору робіт, пов'язаних з технічним, технологічним та організаційним забезпеченням транспортного процесу. Відповідно, це впливає і на залучення, тривалість обслуговування та зайнятість окремих фахівців підприємства. Тому доцільним є розгляд питання щодо формування науково обґрунтованих рекомендацій для визначення раціональної чисельності персоналу та тривалості виконання транспортних послуг залежно від типу вантажу, який надано до перевезення. Це дозволить більш точно визначити тривалість виконання зовнішньоторговельної операції. Для досягнення цієї мети запропоновано застосування імітаційної моделі, яка створена за допомогою пакета автоматизації імітаційного моделювання GPSS World і забезпечує можливість оцінювання тривалості транспортного обслуговування та планування кадрового забезпечення відповідно до функціонального розподілу праці.

Під час формування моделі враховано тривалість виконання основних видів робіт, які здійснюються профільними фахівцями транспортного підприємства при перевезенні генеральних, небезпечних та негабаритних вантажів. Розроблена модель враховує ймовірне виникнення помилок та затримок на кожному з етапів обслуговування, а також середню тривалість таких затримок. Це дозволяє встановити необхідний додатковий час залучення відповідних фахівців для їх усунення та оперативної стабілізації процесу.

Практичне застосування запропонованої імітаційної моделі створює можливість для керівників транспортних підприємств більш ефективно організовувати бізнес-процеси залежно від типу рухомого складу, що використовується для перевезення різних категорій вантажів. Дана модель сприяє визначенню оптимальної кількості залучених фахівців, які необхідні для забезпечення якісного та своєчасного транспортного обслуговування замовників при виконанні доставки товарів у міжнародному сполученні. Окрім цього, модель дозволяє визначити часову складову роботи транспортного підприємства як ланки логістичного ланцюга при виконанні зовнішньоторговельних операцій.

Ключові слова: транспортне підприємство, логістичний ланцюг, посередницькі послуги, міжнародне перевезення, товар.

© Лебідь Є.М., Мазуренко О.О., Лебідь І.Г., Лужанська Н.О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Ефективність реалізації зовнішньоторговельних операцій значною мірою визначається якістю організаційно-управлінських, технічних і технологічних заходів, що супроводжують логістичний процес транспортування товарів. Як одна з ключових ланок логістичного ланцюга, транспортне підприємство забезпечує безперервність переміщення матеріальних потоків, що потребує скоординованої роботи основного й допоміжного персоналу, здатного своєчасно та якісно здійснювати всі операції з транспортного обслуговування. Водночас сучасний ринок праці у сфері логістики та транспортних послуг характеризується дефіцитом кваліфікованих фахівців, що ускладнює формування ефективного кадрового забезпечення. Недостатній досвід або вузька спеціалізація персоналу може призвести до уповільнення логістичних процесів або виникнення помилок у обслуговуванні, що негативно впливає на репутацію підприємства як ланки логістичного ланцюга. У зв'язку з цим виникає потреба у застосуванні сучасних методичних та аналітичних підходів до управління персоналом у транспортно-логістичній діяльності.

Аналіз практичної діяльності транспортних підприємств показує, що обслуговування різних категорій вантажів характеризується відмінностями у логістичних параметрах як для виконавця, так і для замовника. Основні варіації виникають у сфері документального супроводу, підготовки рухомого складу та специфіки технологічних операцій. Компетентність управлінського персоналу відображається в здатності оперативно обробляти запити замовників, забезпечуючи мінімальні відхилення у тривалості виконання логістичних операцій та дотримання стандартів якості. В свою чергу, ефективність допоміжних процесів визначається достатністю кадрового складу, необхідного для забезпечення своєчасного виконання супутніх робіт.

З позиції замовників, взаємодія з транспортним підприємством як ланкою логістичного ланцюга ґрунтується на дотриманні технологічних вимог перевезення, оперативності надання послуг та оптимального співвідношення їх вартості й якості. Формування довготривалих партнерських відносин безпосередньо залежить від здатності перевізника забезпечити конкурентоспроможний рівень логістичного сервісу. У межах своєї діяльності транспортне підприємство самостійно визначає структуру кадрового складу, парк транспортних засобів та стратегічні напрями перевезень, що

дозволяє адаптувати логістичні процеси до потреб постійних замовників. Зміни у попиті на перевезення окремих категорій вантажів спричиняють необхідність застосування відповідних управлінських рішень щодо оптимізації кадрового та матеріально-технічного забезпечення підприємства.

Актуальність наукових досліджень у сфері організації роботи транспортних підприємств у конкурентному логістичному середовищі зумовлює потребу у застосуванні сучасних програмних ресурсів для моніторингу та аналізу показників ефективності обслуговування. Практичне застосування таких інструментів надасть можливість планувати діяльність транспортного підприємства з урахуванням попиту на перевезення окремих груп вантажів, тривалості логістичного циклу обслуговування та достатності кадрових ресурсів. Крім того, стане можливим обґрунтоване визначення необхідної кількості фахівців та транспортних засобів для забезпечення ефективного функціонування підприємства у складі логістичного ланцюга. Аналіз поточного стану підприємства дозволить ідентифікувати наявні недоліки та розробити заходи щодо підвищення результативності логістичного обслуговування в майбутніх періодах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження діяльності транспортних підприємств є досить актуальними в умовах зростання конкуренції на ринку та підвищення вимог замовників до якості надання транспортних послуг. Ключовими потребами для ефективної роботи суб'єктів господарювання є координація дій при виконанні внутрішніх процесів підприємства та організація взаємодії з іншими ланками логістичного ланцюга. В публікаціях [1, с.122, 2, с.3] відображено основні етапи і процеси, які відбуваються при доставці товару у міжнародному сполученні, а також вказано передумови для оптимізації показників ефективності роботи транспортних підприємств. Проте, виконання підготовчо-організаційних робіт, які виконуються фахівцями підприємства з урахуванням індивідуальних потреб замовника в працях не висвітлено. Питання оцінки якості обслуговування як основи роботи транспортного підприємства представлено у роботі [3, с.27], проте авторами не враховано яких змін будуть зазнавати окремі підприємства за умови виконання перевезень різних видів вантажів. В роботі [4, с.6] вказується, що управління якістю логістичних послуг є визначальним фактором для українських транспортних підприємств. Автор наголошує, що серед інших факторів, важливим є підвищення ефективності

персоналу та управління ризиками, що дозволяє забезпечити безперервність постачання й підтримувати конкурентоспроможність. Однак автор не наводить досліджень щодо роботи окремих транспортних підприємств при організації перевезень вантажів у міжнародному сполученні. Оскільки, процес перевезення небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів характеризується суттєвими відмінностями у виконанні підготовчих робіт, потребує ретельного планування та дотримання вимог міжнародного транспортного і митного законодавства, тому доцільним є розробка і застосування імітаційних моделей, здатних дослідити усі необхідні процеси [5, с.2]. В роботі [6, с.543] авторами представлено комплексну модель ланцюга постачань, яка дозволяє врахувати складність прийняття певних рішень щодо процесу організації перевезень. Однак розроблена модель не дає можливості врахувати специфічні вимоги до перевезення окремого виду вантажу. У роботах [7, с.115, 8, с.23] досліджено основні бізнес-процеси, пов'язані з діяльністю транспортного підприємства та обґрунтовано вплив застосування моделювання транспортних процесів на ефективність прийняття управлінських рішень. В роботі [9, с.16] представлено імітаційну модель діяльності транспортного підприємства при організації міжнародних перевезень небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів. Модель враховує особливості виконання робіт для кожного типу вантажу та дає можливість оцінити кількісні й якісні показники роботи підприємства. Використання такого підходу у вивченні виробничих процесів сприяє оптимізації бізнес-процесів і підвищенню рівня обслуговування замовників у сфері міжнародних перевезень.

Постановка завдання. Метою статті застосування імітаційної моделі роботи транспортного підприємства для дослідження показників ефективності роботи суб'єкта господарювання при організації міжнародних перевезень небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів. Це дозволить:

- визначати ефективність роботи окремого транспортного підприємства як ланки логістичного ланцюга на основі дослідження часових характеристик роботи фахівців за профілем діяльності;

- формувати рекомендації для керівництва транспортних підприємств щодо підвищення ефективності обслуговування замовників під час організації перевезень небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів;

- здійснювати планування тривалості виконання організаційних процедур фахівцями транспортного підприємства залежно від типу вантажу, що підлягає транспортуванню;

- визначати необхідну штатну чисельність працівників транспортного підприємства, які забезпечуватимуть організацію перевезень небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів.

Для забезпечення ефективного функціонування транспортного підприємства керівництву, насамперед, необхідно планувати чисельність і завантаженість управлінського персоналу з урахуванням параметрів автопарку, кількості заявок на перевезення кожного виду вантажу, тривалості виконання окремих етапів обслуговування, імовірності виникнення помилок і затримок на відповідних етапах, а також середньої тривалості затримок у разі появи таких відхилень. Ці аспекти мають суттєвий вплив на прийняття рішення стейкхолдерами щодо залучення окремого підприємства як ланки логістичного ланцюга. На основі імітаційної моделі визначення основних характеристик діяльності підприємства дозволить мінімізувати ризики, які можуть виникнути при співпраці з транспортним підприємством на різних етапах зовнішньоторговельної операції.

Виклад основного матеріалу. Дослідження функціонування транспортного підприємства здійснюється за умови організації міжнародних перевезень небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів. З метою проведення більш детального аналізу впливу показників роботи. Для глибшого вивчення впливу показників роботи підприємства на результативність логістичного ланцюга розглянуто два варіанти обслуговування: за наявності помилок у процесі роботи та при їх відсутності.

Процес надання послуг здійснюється за такими основними етапами: прийняття заявки від замовника; підготовка до перевезення; оформлення документів; перший етап перевезення; завершення перевезення у пункті призначення; повернення автотransпортного засобу (АТЗ) на транспортне підприємство та фінальний документообіг. Кожен з досліджуваних етапів характеризується: тривалістю виконання окремого етапу обслуговування; імовірністю виникнення помилок на етапі; імовірністю виникнення затримок на етапі; середнім часом затримки при виникненні помилок.

Перед керівництвом підприємства постає питання планування кадрового забезпечення підприємства, здатного організувати транспортне

обслуговування у найкоротші терміни за відсутності помилок та затримок на усіх етапах, а також з мінімальними відмовами у наданні послуг через зайнятість фахівців або відсутності вільних транспортних засобів. Ці характеристики дозволять стейкхолдерам визначати доцільність співпраці з тим чи іншим транспортним підприємством при формуванні логістичного ланцюга.

В якості прикладу розглянуто виконання міжнародного рейсу на маршруті Київ-Лодзь для всіх варіантів досліджень, оскільки необхідно відобразити саме зайнятість менеджерів у організаційних заходах.

Вхідними параметрами моделі роботи транспортного підприємства є:

- інтенсивність надходження замовлень перевізником при виконанні доставки небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів λ_{ij} зам/міс;
- оцінка середнього часу виконання i -ї роботи W_i на кожному етапі обслуговування при виконанні доставки небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів $m_{ij} \pm \sigma_{ij}$, хв.;
- кількість фахівців транспортного підприємства, необхідних для організації перевезень небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів M_{ij} ;
- кількість транспортних засобів, що є на балансі підприємства для виконання доставки небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів V_j .

Результатом моделювання є отримання наступних основних показників:

- середній час обслуговування t_j , хв.;
- середній час простою в черзі до менеджера b_m , хв.;
- середня довжина черги до менеджера, l_m , замовлень;
- частка заявок, що обслужені без простою в черзі к менеджеру, v_m %;
- кількість менеджерів для обслуговування окремого потоку заявок, n_m ;
- коефіцієнт завантаження менеджерів, ψ_m ;
- середня кількість зайнятих менеджерів, ρ_m ;
- імовірність відмови в обслуговуванні, u_m ;
- пропускна спроможність, P_m , замовлень / міс.

Обмеження імітаційної моделі пов'язані з умовами, що накладаються на вхідний потік заявок при виконанні доставки небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів (припускається, що він є найпростішим, тобто відсутні термінові заявки), а також відсутні явища, що змінюють закономірності часу обслуговування (відмови і збої устаткування і т. п.). Імітаційна модель транспортного підприємства (ІМТП), яка реалізована в пакеті автоматизації імітаційного моделювання

GPSS World [10], побудована з використанням теорії масового обслуговування.

Перевірка адекватності ІМТП, тобто відповідності реальному транспортному підприємству, проводилась для випадку, коли можна визначити значення відгуків системи під час натурних випробувань. Для цього було виконано перевірку гіпотези про близькість середніх значень кожного відгуку моделі $\bar{Y}$ відомим середнім значенням відгуку реального об'єкту Y_i^* . На реальному об'єкті було виконано $N_1=5$ дослідів та сформовано вибірку значень $\{Y_i^*\}$, $i=\overline{1,5}$. За допомогою ІМТП проведено $N_2=5$ дослідів, а на основі відгуків моделі отримано вибірку значень $\{Y_i\}$; $i=\overline{1,5}$. Результати натурних і модельних експериментів представлені в табл. 1.

Основою перевірки гіпотези є різниця $E_n = (\bar{Y}_n - \bar{Y}_{Q_n}^*)$, оцінкою дисперсії якої буде:

$$D_{an} = \frac{(N_1 - 1)D_n + (N_2 - 1)D_n^*}{N_1 + N_2 - 2}. \quad (1)$$

Розраховані оцінки дисперсії D_{an} наведено в табл. 1.

Величини E_n і D_{an} є незалежними статистиками, тому можна використовувати t -статистику:

$$t_n = \left(\bar{Y}_n - \bar{Y}_{Q_n}^* \right) \sqrt{\frac{N_1 N_2}{D_{an} (N_1 + N_2)}}. \quad (2)$$

При кількості ступенів свободи $v=N_1+N_2-2=8$ і рівні значущості $\alpha=0,05$ згідно таблиць розподілу Стюдента визначено критичне значення ($t_{кр}=1,85$). На основі порівняння кожного з розрахованих значень t -статистики в табл. 1 з $t_{кр}$ ($t_n \leq t_{кр}$), гіпотеза про близькість середніх значень відгуків моделі і реального об'єкту приймається. Таким чином, можна говорити про адекватність ІМТП реальному об'єкту.

У дослідженні було виконано моделювання процесу надання транспортних послуг з організації міжнародних перевезень небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів за маршрутом Київ-Лодзь. Результати моделювання роботи транспортного підприємства за наявності помилок в обслуговуванні та без допущення помилок з урахуванням руху АТЗ з вантажем та без вантажу наведено у таблиці 2.

За звітами, отриманими в результаті моделювання роботи підприємства при обслуговуванні замовників, визначені основні показники та розраховано тривалість простою в чергах на обслуговування, які наведено в табл. 3–6.

Результати імітаційного моделювання дають змогу формувати обґрунтовані рекомендації для конкретного транспортного підприємства з ура-

Таблиця 1

Перевірка адекватності імітаційної моделі транспортного підприємства

Відгуки	Значення складових вибірки					$\bar{Y}_n, \bar{V}_n$	$\bar{D}_n, \bar{D}_n^*$	D_{an}	t_n
	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5				
t_{1j}	598	566	493	573	588	563	1540	2501,6	0,779
t_{1j}^*	650	543	504	599	638	587	3464		
t_{2j}	880	756	842	900	885	853	3022	3517,0	1,156
t_{2j}^*	918	795	857	958	941	894	4012		
t_{3j}	619	778	655	685	747	697	3803	6104,1	0,642
t_{3j}^*	538	767	728	594	709	667	8405		
t_{4j}	4950	5869	4609	5107	6162	5339	378647	710392,9	0,963
t_{4j}^*	3920	6160	4043	5891	4256	4854	1042138		
t_{5j}	562	532	544	676	756	614	8555	7594,2	0,898
t_{5j}^*	599	637	581	692	795	661	6633		
t_{6j}	12897	12867	17315	13944	12992	14003	3239162	23123709,3	0,872
t_{6j}^*	12174	11536	20608	12096	1064	11496	43008258		
b_{1j}	291	298	276	263	237	273	518	755,9	1,431
b_{1j}^*	302	325	319	296	241	297	994		
b_{2j}	47	59	55	74	60	59	86	153,7	0,967
b_{2j}^*	62	63	45	86	76	66	221		
b_{3j}	62	76	87	63	92	76	170	109,2	0,753
b_{3j}^*	77	59	72	71	77	71	48		

Таблиця 2

Визначення середнього часу доставки різних типів вантажів за маршрутом Київ-Лодзь

№ етапу	Назва етапу обслуговування	Середня тривалість обслуговування, хв.					
		небезпечні вантажі		негабаритні вантажі		генеральні вантажі	
		помилки наявні	помилки відсутні	помилки наявні	помилки відсутні	помилки наявні	помилки відсутні
1	Прийняття заявки від замовника, t_{11}	598	585	305	290	280	270
2	Підготовка до перевезення, t_{12}	880	796	1036	928	408	392
3	Оформлення документів, t_{13}	619	582	482	428	398	367
4	Перший етап перевезення, t_{14}	4950	4962	5625	5578	4011	3992
5	Завершення перевезення у пункті призначення, t_{15}	338	345	585	558	269	255
6	Повернення АТЗ на транспортне підприємство та фінальний документообіг, t_{16}	12897	12892	17480	17454	8962	8779
1-6	Тривалість доставки вантажів, t_1	20283	20162	25511	25236	14327	14055

Таблиця 3

Результати моделювання доставки небезпечних вантажів без помилок та за наявності помилок у роботі фахівців транспортного підприємства

Виконавець	Наявність помилок						Без помилок					
	b_m	η_m	v_m	n_m	ψ_m	ρ_m	b_m	η_m	v_m	n_m	ψ_m	ρ_m
Менеджер з логістики	291	3,37	35,1	2	0,84	1,68	290	3,37	35,6	2	0,83	1,66
Логіст	47	0,18	84,2	2	0,49	0,99	41	0,17	83,8	2	0,47	0,93
Юрист	62	0,36	82,9	3	0,62	1,83	50	0,29	77,1	3	0,57	1,72
Водій	231	1,33	62,8	48	0,83	35,62	244	1,42	76,4	48	0,83	35,84
АТЗ	231	1,33	62,8	34	1,01	30,35	244	1,42	76,4	34	1,02	30,46
Вантажник	26	0,06	106,6	1	0,28	0,28	26	0,06	83,3	1	0,28	0,28
Механік	0	0,00	112	1	0,13	0,13	0	0,00	112	1	0,13	0,13
Бухгалтер	116	0,45	55,1	1	0,54	0,54	114	0,45	55,4	1	0,53	0,53

Таблиця 4

Результати моделювання доставки негабаритних вантажів без помилок та за наявності помилок у роботі фахівців транспортного підприємства

Виконавець	Наявність помилок						Без помилок					
	b_m	η_m	ν_m	n_m	ψ_m	ρ_m	b_m	η_m	ν_m	n_m	ψ_m	ρ_m
Менеджер з логістики	53	0,24	79,7	2	0,48	0,95	53	0,24	80,4	2	0,47	0,95
Логіст	25	0,04	94,2	2	0,35	0,69	19	0,04	96,4	2	0,32	0,69
Юрист	92	0,31	72,2	2	0,57	1,13	63	0,31	72,7	2	0,52	1,13
Водій	476	1,60	58,7	39	0,81	28,22	452	1,52	60,3	39	0,81	28,22
АТЗ	476	1,60	58,7	26	1,06	24,30	452	1,52	60,3	26	1,05	24,30
Вантажник	7	0,01	100,6	1	0,16	0,16	6	0,01	101,5	1	0,16	0,16
Механік	2	0,01	105	1	0,16	0,16	2	0,01	104	1	0,16	0,16
Бухгалтер	0	0,00	112,0	1	0,06	0,06	0	0,00	112,0	1	0,03	0,06

Таблиця 5

Результати моделювання доставки генеральних вантажів без помилок та за наявності помилок у роботі фахівців транспортного підприємства

Виконавець	Наявність помилок						Без помилок					
	b_m	η_m	ν_m	n_m	ψ_m	ρ_m	b_m	η_m	ν_m	n_m	ψ_m	ρ_m
Менеджер з логістики	34	0,92	62,0	4	0,77	3,09	32	0,91	63,1	4	0,76	3,06
Логіст	26	0,25	75,5	2	0,56	1,13	25	0,22	77,6	2	0,55	1,10
Юрист	82	0,37	43,8	1	0,66	0,66	66	0,30	48,6	1	0,63	0,63
Водій	85	1,56	70,4	68	1,05	64,29	81	1,48	71,5	68	1,05	64,06
АТЗ	85	1,56	70,4	60	1,04	56,34	81	1,48	71,5	60	1,04	56,11
Вантажник	38	0,17	55,3	1	0,65	0,65	35	0,16	58,8	1	0,63	0,63
Механік	26	0,24	57	1	0,64	0,64	25	0,22	59	1	0,63	0,63
Бухгалтер	120	1,09	52,0	2	0,71	1,40	120	1,10	52,4	2	0,69	1,40

Таблиця 6

Показники моделювання доставки небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів за наявності та відсутності помилок в обслуговуванні

Показники	Небезпечні		Негабаритні		Генеральні	
	Наявність помилок	Відсутність помилок	Наявність помилок	Відсутність помилок	Наявність помилок	Відсутність помилок
імовірність відмови в обслуговуванні, y_m	0,20	0,16	0,18	0,17	0,18	0,17
пропускна спроможність, P_m	24,9	26,0	15,2	15,5	61,2	61,9

хуванням спеціалізації наявного рухомого складу та структури кадрового забезпечення за функціональними напрямками. Це створює передумови для оптимізації поточного функціонування підприємства як логістичної ланки та забезпечує можливість стратегічного планування кадрового й матеріально-технічного забезпечення на майбутні періоди. Крім того, дана ІМТП дозволяє досліджувати процес перевезення різних типів вантажів, враховуючи технологічну послідовність виконання усіх етапів транспортно-логістичного обслуговування.

Висновки. Отримані результати моделювання роботи транспортного підприємства забезпечують можливість визначення необхідної чисель-

ності персоналу за професійними категоріями. На основі кількісного та якісного складу рухомого парку за видами спеціалізації стає можливим визначення тривалості виконання підготовчо-організаційних та основних логістичних операцій з доставки вантажів у міжнародному сполученні. Відповідне коригування зайнятості працівників здійснюється з урахуванням імовірності виникнення помилок або їх відсутності на різних етапах логістичного процесу.

Розроблена імітаційна модель забезпечує можливість оцінки показників ефективності персоналу транспортного підприємства як за умов коректного виконання функціональних обов'язків, так

і в ситуаціях, коли виникають помилки у їх роботі. Модель враховує структуру логістичного ланцюга, дозволяючи визначати оптимальну кількість працівників за функціональними напрямками, необхідними для обслуговування потоку замовлень на перевезення різних видів вантажів відповідно до можливостей парку АТЗ. Суттєвою перевагою проведеного дослідження є можливість оцінки ефективності діяльності персоналу при організації перевезень небезпечних, негабаритних та генеральних вантажів, а також визначення категорій працівників, чисельність яких залишається сталою за різних умов функціонування логістичного

ланцюга. Водночас підвищення якості логістичного обслуговування може сприяти оптимізації окремих груп персоналу. Отримані характеристики функціонування транспортного підприємства в межах логістичного ланцюга свідчать про значну варіативність показників роботи персоналу залежно від спеціалізації рухомого складу та рівня кваліфікації фахівців. При цьому тривалість логістичного обслуговування є меншою за умови відсутності помилок у роботі персоналу, що пояснюється як своєчасним виконанням посадових обов'язків, так і зниженням потреби в усуненні помилок, допущених іншими фахівцями.

Список літератури:

1. Łukasik Z., Kuśmińska-Fijałkowska A., Olszańska S. The impact of the organisation of transport processes on the efficient use of a fleet of vehicles. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2021. Vol. 110. P. 87–95. URL: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.110.7> (date of access: 22.11.2025).
2. Ковальова М. Транспортне забезпечення зовнішньоторговельних операцій: принципи та критерії вибору. *Економіка та суспільство*. 2022. № 38. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-38-42> (дата звернення: 22.11.2025).
3. Formation of the conditions for the effective functioning of the transportation system of the road transport enterprise / T. Volobuyeva et al. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. 2024. Vol. 19, no. 1. P. 21–28. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-21-28> (дата звернення: 22.11.2025).
4. Льченко Т. Управління якістю логістичних послуг підприємства. *Економіка та суспільство*. 2025. № 72. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-55> (дата звернення: 22.11.2025).
5. Agent-Based Risk Analysis Model for Road Transportation of Dangerous Goods / H. Kanj et al. *Results in Engineering*. 2025. P. 103944. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103944> (date of access: 22.11.2025).
6. Manuj I., Sahin F. A model of supply chain and supply chain decision-making complexity. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2011. Vol. 41, no. 5. P. 511–549. URL: <https://doi.org/10.1108/09600031111138844> (date of access: 22.11.2025).
7. Popa C. The analysis of freight forwarding services using the business process modelling tools. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2022. Vol. XXV, no. 2. P. 110–116. URL: <https://doi.org/10.21279/1454-864x-22-i2-011> (date of access: 22.11.2025).
8. Vorkut T., Volynets L. Devising a method for assessing the efficiency in managing logistics operations of motor transport enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6, no. 3 (132). P. 17–24. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317567> (date of access: 22.11.2025).
9. Development of a simulation model of the activities of a transport and forwarding enterprise in the organization of international road cargo transportation / I. Lebid et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 6, no. 3 (126). P. 6–17. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291039> (date of access: 22.11.2025).
10. GPSS World Reference Manual. URL: https://athena.ecs.csus.edu/~mitchell/csc148/gpssW/Reference%20Manual/reference_manual.htm (date of access: 23.11.2025).

Lebid Ie.M., Mazurenko O.O., Lebid I.H., Luzhanska N.O. APPLICATION OF A SIMULATION MODEL OF A TRANSPORT ENTERPRISE IN LOGISTICS CHAIN PLANNING

The process of planning a logistics chain involves engaging business entities capable of providing a high level of service quality in the execution of foreign trade operations. Transport enterprises have a significant impact on the efficiency of the logistics chain during international cargo delivery. Therefore, an important stage in the organization of export operations is the selection of a carrier capable of meeting customer requirements according to specific criteria. Such criteria typically include the duration and cost of cargo delivery, as well as the quality of service. The performance indicators of a transport enterprise vary depending on the available human and technical resources, as well as the type of cargo requiring transportation. Differences in the requirements for the transportation of general, hazardous, and oversized cargo necessitate performing various tasks related to the technical, technological, and organizational support of the transport process. Accordingly, this affects the involvement, service duration, and workload of individual specialists at the

enterprise. Therefore, it is reasonable to consider the development of scientifically grounded recommendations for determining the optimal number of personnel and the duration of transportation services depending on the type of cargo being transported. This will make it possible to determine more accurately the duration of the foreign trade operation. To achieve this goal, it is proposed to use a simulation model created with the GPSS World simulation modeling automation package, which provides the ability to estimate the duration of transport services and plan staffing in accordance with the functional distribution of labor.

When developing the model, the duration of the main operations performed by specialized personnel of the transport enterprise during the transportation of general, hazardous, and oversized cargo was taken into account. The model also considers the probability of errors and delays at each stage of service, as well as the average duration of such delays. This makes it possible to determine the additional time required for engaging the relevant specialists to eliminate these issues and promptly stabilize the process.

The practical application of the proposed simulation model enables managers of transport enterprises to organize business processes more efficiently, depending on the type of rolling stock used for transporting different categories of cargo. This model helps determine the optimal number of specialists needed to provide high-quality and timely transport services to customers during international cargo delivery. In addition, the model makes it possible to determine the time component of the transport enterprise's operations as a link in the logistics chain when performing foreign trade operations.

Key words: *transport enterprise, logistics chain, intermediary services, international transportation, cargo.*

Дата надходження статті: 23.11.2025

Дата прийняття статті: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Павленко О.І.

Український державний університет науки і технологій

Баркалова Н.О.

Український державний університет науки і технологій

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ МАРШРУТІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ У ВАНТАЖНИХ АВТОПЕРЕВЕЗЕННЯХ

У статті розглядається проблема оптимізації транспортних процесів у логістичних ланцюгах, яка є однією з ключових у сучасній економіці та управлінні перевезеннями. Раціональна організація транспортних потоків забезпечує не лише зниження витрат підприємств, а й сприяє розвитку конкурентних переваг на ринку. Дослідження орієнтоване на пошук ефективних методів, що дозволяють мінімізувати витрати при організації вантажних перевезень, підвищити продуктивність транспортної діяльності та забезпечити стабільність логістичної системи. Для досягнення поставленої мети проаналізовано наукові праці вітчизняних і зарубіжних авторів, присвячені оптимізації логістичних маршрутів, систематизовано їх основні положення та окреслено сучасні тенденції у сфері транспортної логістики.

У дослідженні використано методи математичної статистики для оцінки ефективності різних варіантів оптимізації, а також методи техніко-економічних розрахунків для визначення рівня витрат і тарифів на перевезення. У прикладній частині роботи наведено приклади застосування методів дослідження операцій, зокрема методу найближчого сусіда та методу апроксимації Фогеля, які дозволили обґрунтовано визначити оптимальні маршрути перевезень і показати їх переваги порівняно з традиційними схемами організації транспортування. Отримані результати створюють наукову та економічну основу для формування сучасної системи перевезень, що відповідає вимогам ринку та забезпечує більш гнучке управління ресурсами. Особлива увага приділяється практичному значенню проведеного аналізу. Оптимізація логістичних схем автомобільних перевезень сприяє зменшенню частки транспортно-логістичної складової у кінцевій вартості продукції, що безпосередньо впливає на її доступність для споживачів. Це підвищує конкурентоспроможність вітчизняних товарів як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках, забезпечує більш ефективне використання транспортних засобів, скорочення часу доставки та підвищення якості обслуговування клієнтів. У ширшій перспективі результати дослідження сприятимуть зростанню економічної стійкості підприємств транспортної галузі, створенню нових можливостей для інвестицій у логістичну інфраструктуру та збільшенню надходжень до державного бюджету. Матеріали статті можуть бути використані підприємствами транспортно-експедиційної сфери, у навчальному процесі закладів вищої освіти, а також під час розроблення державних стратегій розвитку транспортної логістики в Україні.

Ключові слова: оптимізація транспортних процесів, логістичні маршрути, витрати на перевезення, метод найближчого сусіда, метод Фогеля.

Постановка проблеми. В умовах сьогоденних викликів невизначеності, дієве керування логістичними процесами є надзвичайно важливим для успіху підприємства на ринку. Удосконалення логістичних процесів дає змогу прискорити виконання процесів, покращити якість та продуктивність послуг, зменшити витрати, підвищити рівень задоволення клієнтів та забезпечити підприємству конкурентні ринкові переваги.

Виклики, що постали під впливом четвертої індустріальної революції для суб'єктів господарювання, можна вважати водночас можливостями для оптимізації багатьох бізнес-процесів та загрозами для бізнесу, що використовує традиційні підходи. Особливі виклики стоять перед сферою логістики та всіма учасниками ринку логістичних послуг. Найбільш суттєвою зміною є впровадження новітніх технологій [1, с. 13].

Методи оптимізації широко використовуються для вирішення таких проблем, як теорія оптимальних процесів та оптимальне регулювання. Без розвитку і застосування методів оптимізації управління логістичними процесами було б неможливим. Багато задач економічної кібернетики (мережеве планування, управління запасами, транспортом тощо), управління виробництвом (розподіл завдань, обробка деталей, конвеєрне виробництво) та оптимального програмування зводяться до задач транспорту та збуту. Інша група задач теорії оптимізації - це задачі оптимального проектування. Наприклад, проектування логістичної системи із заданими обмеженнями [1, с. 15].

Все це дає змогу стверджувати, що доцільно провести дослідження проблем ефективної організації автомобільних вантажоперевезень з оптимальним плануванням часу та забезпеченням мінімальної ціни перевезення вантажу. Оскільки оптимальний час і ціна транспортування вантажу знижують ризики його пошкодження та втрати. Водночас залишається актуальним завдання зменшення витрат під час автомобільних перевезень.

Постановка завдання. Метою роботи є розглянути можливості оптимізації автомобільних вантажних перевезень за допомогою методів найближчих сусідів та методу апроксимації Фогеля та обрати серед наведених шляхів оптимізації, той який на нашу думку є найбільш доцільним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У працях вітчизняних і зарубіжних дослідників значна увага приділяється вивченню стратегій удосконалення логістики та маркетингу продукції сільськогосподарських підприємств на основі кооперації. У країні до них належать П. Саблук, О. Шпикуляк, М. Малік та І. Баланюк. Проте в їхніх роботах не розглядаються детально сучасні підходи, що базуються на програмуванні.

Як показує аналіз, сучасні методи розв'язання проблеми дискретної оптимізації транспортних процесів, що відбуваються в логістичних системах, не є досконалими і не дають однозначного рішення. Особливо це стосується оптимізації транспортних маршрутів, яка є предметом багатьох наукових досліджень [2, с. 55], автори проводять огляд існуючих методів і моделей оцінки ефективності транспортних і різних видів логістичних операцій у ланцюзі поставок. Згідно з їхнім аналізом, на сьогодні не існує єдиного підходу, який би адекватно оцінював ефективність відповідних процесів [2, с. 55]; на відміну від [2, с. 55], в роботі [3, с. 10] автори провели детальний аналіз впливу різних методів оптиміза-

ції на розв'язання задач доставки вантажів в умовах невизначеності попиту. Крім того, в [3, с. 10] порівнюються кілька логістичних стратегій, що використовуються транспортними компаніями, і визначається найбільш ефективна з них з точки зору успіху.

Модель розв'язання багатоцільової задачі маршрутизації транспортних засобів в умовах обмеженого часу була запропонована в [4, с. 13]. Задача розв'язується за допомогою модифікованого генетичного алгоритму. Оптимальним рішенням тут є компроміс між вартістю перевезення вантажів та розміром автопарку, необхідного для обслуговування клієнтів. В роботі [5, с. 55] автори досліджують процес транспортування вантажів у мережевому представленні з метою вдосконалення існуючих методів визначення оптимальних характеристик транспортних мереж. Встановлено вплив показників структури мережі, напрямку руху та пропускної здатності транспортних комунікацій на визначення фактичної щільності руху на стаціонарній транспортній мережі.

У роботі [6, с. 450] запропоновано новий алгоритм, який може виконувати процедуру оптимізації, враховуючи пропускну здатність кожного ребра графа, одночасно розглядаючи всі шляхи між вершинами графа. Метод базується на представленні графа у вигляді електричної мережі, кожна ділянка якої має певний опір, що характеризує відповідну пропускну здатність. Також, на думку авторів [6, с. 450], запропонований метод може концентруватися переважно на обчисленнях проблемної області та областей з високорівневою структурою.

Це дозволяє більш ефективно використовувати обчислювальний час, не витрачаючи його на розв'язання несуттєвих задач, які потребують громіздких обчислень. Однак глибший аналіз методу [6, с. 456] показує, що тут розв'язання задачі дискретної оптимізації може бути зведене до розв'язання задачі лінійного алгоритму, пов'язаної з розв'язанням відповідних одночасних лінійних рівнянь певної розмірності. Тому, принаймні тут, пошук методів розв'язання систем рівнянь якомога більшої розмірності при заданих обчислювальних ресурсах залишається актуальним.

Наведений вище аналіз літератури показує, що на сьогоднішній день існує досить великий набір моделей і методів, які використовуються для побудови оптимальних маршрутів доставки вантажів. Однак більшість з них застосовуються для розв'язання дискретних задач оптимізації маршрутів в задачах транспортної логістики невеликої

розмірності і є статичним представленням транспортної мережі без урахування реальної динаміки транспортних потоків в РСМ. На противагу цьому, результати нашого аналізу показують перспективність використання методу самоорганізації мурашиних колоній, модифікованого згідно з [7, с. 51], для оптимізації маршрутів доставки вантажів в умовах нестационарної динаміки транспортних потоків високої щільності.

Аналіз наявних методів оптимізації логістичних маршрутів. Традиційні підходи до оптимізації маршрутів доставки вантажів базуються на мінімізації функції витрат на основі відстані. Нові підходи також використовують час як цільову функцію для мінімізації.

Економія транспортних витрат має велике значення як для логістичних компаній, так і для суспільства в цілому. Ключовим питанням у мінімізації транспортних витрат є те, як науково правильно вибрати та оцінити постачальників логістичних послуг. Оцінка транспортної ефективності є важливим фактором для розгляду постачальників логістичних послуг [8, с. 50].

Оцінка ефективності транспорту – це оцінка ефективності транспортної діяльності та процесів. Як правило, вона передбачає прийняття певної системи показників, дотримання певних процедур і використання якісних і кількісних методів для визначення загальної ефективності та результативності транспортної діяльності та процесів за певний період часу, таким чином виконуючи єдині критерії оцінки. Оцінка ефективності транспорту є важливим кроком для логістики та інших пов'язаних з нею бізнесів. Оцінюючи ефективність транспорту, логістичні компанії можуть оптимізувати процеси та покращити економічні вигоди [9, с. 54].

Оптимізація маршрутів передбачає використання спеціалізованих програмних засобів для створення оптимальних маршрутів для вантажних перевезень. Це програмний продукт для моделювання логістичних систем з урахуванням різних факторів, таких як:

- відстані;
- час у дорозі;
- завантаження транспортних засобів;
- дорожнє покриття і транспортна інфраструктура;
- кількість і розмір вантажів;
- дорожній рух і погодні умови.

Для вирішення проблеми організації раціональної взаємодії транспортних процесів з процесами виробництва, логістики і систем спожи-

вання, а також взаємодії окремих видів транспорту необхідно розглядати загальну інтегровану транспортно-технологічну систему. Це гарантує вищу загальну ефективність порівняно з загальною ефективністю окремих частин.

Економічна ефективність транспортного процесу оцінюється за допомогою регіональних, інтегральних, натуральних та економічних показників, а також показників позатранспортних ефектів. Локальні критерії ефективності використовуються, коли порівнювані транспортні заходи відрізняються за одним показником [10, с. 1086].

Інтегровані показники ефективності використовуються, коли заходи, що впроваджуються, одночасно змінюють декілька характеристик транспортного процесу. Технічні параметри транспортного процесу часто використовуються як локальні або часткові показники ефективності [11, с. 25].

Більшість науковців використовують мінімум витрат як критерій оптимізації, хоча в деяких випадках пропонується також максимізація обсягу перевезень і прибутку. Однак в умовах мінливого попиту мінімізація витрат не дає загальної картини успішності системи [12, с. 335].

Розглянемо обрані методи оптимізації логістичних маршрутів.

Метод найближчого сусіда. Метод найближчого сусіда було обрано, оскільки він є одним з найпростіших варіантів для розрахунків в операційних дослідженнях. Процедури цього методу відносно часто використовуються на практиці саме тому, що вони не змінюються в процесі розрахунку і є простішими та чіткішими. Ще однією перевагою є те, що цей метод можна використовувати для пошуку оптимального рішення проблеми обігу за відносно короткий час. Зазвичай цей метод не обмежується кількістю розподільчих станцій. Однак добре відомо, що чим більший розмір транспортної задачі, тим складнішою стає процедура пошуку оптимального рішення. У наших розрахунках це ідеально підходить для матриць розміром від 7x7 до 26x26, оскільки ми намагаємося застосовувати розрахунки як до простіших розрахунків, так і до більш складних кругових задач [13, с. 425].

Метод апроксимації Фогеля. Метод апроксимації Фогеля займається пошуком оптимального рішення з урахуванням співвідношення індексів цін. Цей метод завжди порівнює два найнижчі індекси цін як у стовпці, так і в рядку. Ці відмінності використовуються для оцінки того, в якому ящику невдача заповнення найдешевшим варіан-

том мала б найгірший вплив на загальний результат [14, с. 78].

На першому етапі процедури апроксимаційного методу Фогеля розраховуються різниці двох найменших показників для кожного рядка та стовпця. Індивідуальні відмінності записуються у зовнішню частину таблиці. Для кожного рядка значення записується зліва після таблиці, а для кожного стовпця значення записується під таблицею. Тоді найбільша різниця вибирається з обчислених, і тепер вона позначає площу для наступної процедури розрахунку [15, с. 114].

Наступним кроком у вибраній області, тобто стовпці чи рядку, є пошук поля з найнижчою ставкою. Потім ця клітинка замінюється на найвище можливе значення. Максимальне значення залежить від обмежувальних умов, які зазвичай записуються в останньому стовпці та рядку сформованої матриці. У цій статті модифікована версія методу апроксимації Фогеля представляє основний використаний метод. Цей метод не враховує жодних обмежень щодо потужностей або цін. Метою розрахунку модифікованої версії цього методу є знаходження найкоротшої відстані, завдяки якій транспортна задача може бути закрыта [16, с. 204].

Виклад основного матеріалу. Процедура обчислення методом найближчого сусіда спочатку вимагає формування матриці індивідуальних відстаней. Ці відстані завжди беруться від однієї розподільчої станції до іншої, тобто від одного споживача до іншого, з урахуванням усіх можливостей.

Відстані завжди вносяться в матрицю в обох напрямках згідно з наступними правилами, які наведені в табл. 1. Обидва напрямки необхідно враховувати, оскільки міста, що розглядаються, найімовірніше, пересуваються дорогами з одностороннім рухом, що суттєво обмежує операції та впливає на відстані між окремими пунктами [17, с. 45].

Таблиця 1

Правила матриці – метод найближчого сусіда

	V_1	V_2
V_1	0	Відстань від V_1 до V_2
V_2	Відстань від V_2 до V_1	0

При створенні матриці відстаней необхідно вибрати початкову точку. Для розрахунків у цій статті початковою точкою завжди є точка V_1 , яка є маркером обраного місця розташування підприємства.

Наступним кроком є пошук найближчого до цієї точки пункту дистрибуції. З точки V_x , до якої перемістився розрахунок, ми знову потрапляємо в рядок з такою ж міткою. Там, у рядку матриці, знову знаходимо найближчу ненульову відстань. Просування не відбувається, оскільки нульові відстані показуються тільки там, де знаходиться одна і та ж станція розвантаження.

Наступне правило полягає в тому, що всі станції повинні бути пройдені до повернення на початкову станцію. Ця процедура повторюється до тих пір, поки кожен стовпець і кожен рядок не досягне заданої точки рівно один раз. В результаті, кількість кілометрів, пройдених під час розв'язання задачі про переміщення, є сумою всіх вибраних відстаней. У цьому документі ці значення будуть виділені в таблиці блакитним кольором [18, с. 125].

Розрахунок кращих і ефективніших маршрутів починається за допомогою методу найближчого сусіда. Цей метод має чіткі правила, він не є надто складним і тому підходить для визначення перших пропозицій нових оптимізованих маршрутів. Загальна процедура розрахунку за методом найближчого сусіда наведена в теоретичній частині цієї статті в розділі «Методологія роботи», тому ми будемо мати справу лише з окремими маршрутами із заданими значеннями.

Першим кроком для розрахунку нового маршруту є формування матриці відстаней між окремими точками. У матриці окремі зупинки задані за допомогою їх міток V_x . Є така найкоротша дистанція, коли пробігається найменше кілометрів. Кожна комбінація двох місць надається зі значеннями в обох напрямках [19, с. 15].

Цей факт необхідний, тому що в центрах міст часто зустрічаються односторонні вулиці та інші обмеження, які необхідно враховувати. Для визначення індивідуальних відстаней використовувалася Інтернет-карта з планувальником маршрутів. Значення, записані в матрицю, виражаються в кілометрах (табл. 2).

У понеділок кількість розвантажень через станції найменша, відповідно матриця відстаней найменша, а розрахунок за методом найближчого сусіда найлегший з усіх маршрутів. Остаточний оптимізований маршрут виходить з точки V_1 і продовжується так: $V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4 \rightarrow V_5 \rightarrow V_7 \rightarrow V_6 \rightarrow V_1$. На цьому маршруті проїхано 60,3 кілометрів.

Першим кроком процедури в цій статті є коригування матриці відстані, яка була сформована в попередньому методі. Відбудеться зміна на головній діагоналі, де знаходяться 0s. Ці нульові зна-

Таблиця 2

Розрахунок за методом найближчого сусіда (день тижня – понеділок)

	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
V_1	10,6	11,6	22,2	24,5	29,1	26,0
	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	
V_2	1,1	11,9	14,2	18,9	15,8	
	V_4	V_5	V_6	V_7		
V_3	10,9	13,2	17,8	14,9		
	V_5	V_6	V_7			
V_4	4,1	7,8	4,9			
	V_6	V_7				
V_5	7,2	4,8				
	V_6					
V_7	4,3					

Таблиця 3

Побудова опорного плану (1 етап)

Замовники Відправники	30	10	15	Штрафи
25	4	2	5	$ 4 - 2 = 2$
30	6	3	1	$ 3 - 1 = 2$
Штрафи	$ 4 - 6 = 2$	$ 2 - 3 = 1$	$ 5 - 1 = 4$	

Таблиця 4

Побудова опорного плану (2 етап)

Замовники Відправники	30	10	15	Штрафи
25	4	2	5	$ 4 - 2 = 2$
30	6	3	15	$ 6 - 3 = 3$
Штрафи	$ 4 - 6 = 2$	$ 2 - 3 = 1$		

чення буде змінено на X. Оскільки немає обмежень щодо пропускної спроможності в заданих маршрутах розподілу, ми шукатимемо два найменших значення відстаней у кожному стовпці та рядку.

Для обчислення різниці використовуються два найменших значення. Потім ця різниця буде записана у зовнішню частину таблиці так само, як і у випадку стандартного методу. Кроки виконуються для всіх стовпців і рядків, і з обчислених різниць буде вибрано різницю найбільшого значення. У порівнянні зі стандартним методом апроксимації Фогеля, де тепер слідував би вибір найменшої швидкості та заповнення максимуму обмежувальними умовами, у вибраній області буде обрана комірка з найменшим значенням відстані. Ця процедура повторюється, поки не буде закрита вся транспортна проблема [20, с. 161].

Щоб побудувати опорний план, близький до оптимального, необхідно, наприклад, обчислити різницю між двома найменшими числами в кожному рядку і стовпчику (табл. 3).

Потім обирається той, що має найбільшу кількість (різницю) розрахованих штрафів. У випадку таблиці 1 це номер 4. Потім вибира-

ється рядок, що відповідає цій різниці, і з нього береться найменше число. Якщо найбільша різниця знаходиться в певному рядку, пошук здійснюється в цьому рядку. Якщо штрафи однакові, то до уваги беруться значення стовпців [21, с. 68]. Таким чином, після знаходження мінімального значення в рядку/стовпчику, що відповідає максимальному штрафу, на його місце вводиться максимальне значення вантажу відправлення (табл. 4).

Якщо замовник отримує очікувану кількість товару, цей рядок/стовпець виключається з побудови опорного плану. Розрахунок продовжується, але штраф має бути розрахований знову для нової матриці витрат [22, с. 101]. Цей процес повторюється до тих пір, поки всі товари не будуть розподілені (табл. 5, 6).

Коли залишиться один рядок/стовпчик (табл. 5), він заповнюється різницями того, що потрібно доставити:

$$30 - 10 - 15 = 5; 30 - 5 = 25.$$

В результаті всіх операцій буде отримано наступний опорний план.

Таблиця 5

Побудова опорного плану (3 етап)				
Замовники Відправники	30	10	15	Штрафи
25	4	2	5	
30	6	10	15	
Штрафи	$ 4 - 6 = 2$			

Таблиця 6

Опорний план за методом Фогеля				
Замовники Відправники	30	10	15	
25	25	0	0	
30	5	10	15	

Сума витрат для даного плану становить:

$$S = 100 + 0 + 0 + 30 + 30 + 15 = 175,$$

де S – сума витрат.

У більшості випадків цей план є неоптимальним і слід застосовувати методи подальшої оптимізації транспортної задачі, але є випадки, коли метод Фогеля часто є оптимальним транспортним планом. У цьому прикладі (табл. 6) метод Фогеля застосовується до класичної матриці витрат.

Однак, щоб використати його для нечітких – потрібно модифікувати наступним чином:

1. Нечітка вартість: транспортні витрати виражаються у вигляді нечітких чисел (наприклад, трикутників або трапецій).

2. Розрахунок нечітких різниць витрат: для кожного рядка і стовпця розраховуються нечіткі різниці витрат, як і в класичному методі, але

з використанням операцій над нечіткими числами.

3. Відбір комірок за нечіткою вартістю: на основі визначених пріоритетів вибирається комірка з найменшою нечіткою вартістю;

4. Розподіл на основі нечіткості: товари розподіляються на основі нечітких значень попиту та пропозиції;

5. Коригування таблиці: застосовується нечітка корекція попиту та пропозиції [23, с. 189].

Метод Фогеля для нечітких витрат дозволяє ефективно впоратися з невизначеністю в задачі оптимізації транспортних витрат, зберігаючи при цьому переваги класичного підходу.

Висновки. В роботі досліджено методи оптимізації маршрутів для зменшення витрат при перевезенні вантажів автомобільним транспортом. Оптимізація логістичних шляхів у вантажних автоперевезеннях – це дієвий засіб для зменшення витрат та збільшення продуктивності перевезень. Завдяки застосуванню найновіших алгоритмів, систем моніторингу й інтеграції з іншими складовими логістики, можна досягти відчутних результатів у зниженні витрат палива та часу, а також поліпшенні екологічних показників. Щоб досягти потрібних результатів, було необхідно сформувати достатню базу експертних знань, працюючи з літературою. Для оптимізації одного маршруту було використано метод найближчого сусіда, що спростило обчислення. За допомогою методу апроксимації Фогеля було змінено 3 з 5 маршрутів розподілу. Це означає, що метод апроксимації Фогеля виявився ефективнішим, ніж метод найближчого сусіда.

Список літератури:

1. Босняк М. Г. *Вантажні автомобільні перевезення*. Київ : ВД Слово, 2010. 408 с.
2. Lukinskiy V., Dobromirov V. Methods of evaluating transportation and logistics operations in supply chains. *Transport and Telecommunication*. 2016. Vol. 17. P. 55–59.
3. Balasescu S., Balasescu M. Optimization methods for supply chain activities. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series V: Economic Sciences*. 2014. Vol. 7(56). P. 9–16.
4. Qingyou Y., Zhang Q. The optimization of transportation costs in logistics enterprises with time-window constraints. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015. Vol. 2015. P. 10–15.
5. Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O., Dudnik A., Omarov D. Improvement of the methods for determining optimal characteristics of transportation networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6/3(84). P. 54–61.
6. Harvey H. S. The transportation problem and the Vogel approximation method. *Decision Sciences*. 1970. Vol. 1, Issue 3–4. P. 441–457.
7. Глазкова А. С. Індустріальнологістична інфраструктура як основа інноваційної модернізації економіки. *Економіка та управління національним господарством*. 2016. Вип. 2. С. 49–52.
8. Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. *Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Посібники*. URL: http://posibnyky.vntu.edu.ua/k_m/t2/zm2.html (дата звернення: 03.03.2025).
9. Charnes A., Cooper W. W. The stepping stone method of explaining linear programming calculations in transportation problems. *Management Science*. 1954. Vol. 1. P. 49–69.

10. Wang X., Chen Y., Zhang L. Construction of a system for evaluating the efficiency of transport of logistics companies. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2013. Vol. 6, no. 4. P. 1084–1104.
11. Бойченко М. В. Проблеми транспортної логістики вантажних перевезень в Україні. *Вісник економічної науки України*. 2018. № 2(35). С. 22–26.
12. Zhaoyuan W., Huanlai X., Tianrui L. A modified ant colony optimization algorithm for network coding resource minimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2016. Vol. 20(3). P. 325–342. DOI: 10.1109/TEVC.2015.2496839.
13. Danchuk V., Bakulich O., Svatko V. An Improvement in Ant Algorithm Method for Optimizing a Transport Route with Regard to Traffic Flow. *Procedia Engineering*, 2017. V. 187. P. 425–434.
14. Данчук В. Д., Сватко В. В. Оптимізація пошуку шляхів по графу в динамічній задачі комівояжера методом модифікованого мурашиного алгоритму. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2012. № 2. С. 78–86.
15. Воркут Т. *Системні методи керування, технологія та організація виробництва і експлуатації автомобілів : тенденції розвитку ринку вантажних автомобільних перевезень в Україні*. 7-ме вид. Київ : НТУ, ТAU, 2010. 114 с.
16. Негода А., Русак Д. *Міжнародна логістика та глобальні ланцюги постачань : навчальний посібник у схемах*. Київ, 2023. 268 с.
17. Сокур І. М., Сокур Л. М., Герасимчук В. В. *Транспортна логістика : навч. посіб.* Київ : Центр навчальної літератури, 2019. 220 с.
18. Полякова О. М., Шраменко О. В. Сучасні тенденції розвитку транспортно-логістичної інфраструктури в Україні і світі. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2017. Вип. 58. С. 126–134. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vetp_2017_58_17.
19. Савицький Е. Вплив оптимізації логістичних процесів на ефективність комерційної діяльності підприємств. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 52. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-47>
20. Шатрова І. А., Демидова О. О., Матвієвський С. В. Алгоритм оптимального розв'язання ресурсної задачі з використанням методу потенціалів транспортної задачі лінійного програмування. *Наука та освіта : збірник праць XVI Міжнародної наукової конференції, 4–11 січня 2022 р., м. Хайдусобосло, Угорщина*. Хмельницький : Наука та освіта, 2022. С. 161–164.
21. Hanzl J., Bartuska L., Rozhanskaya E., Prusa P. Application of Floyd's algorithm on transport network of South Bohemian Region. *Communications: Scientific Letters of the University of Žilina*. 2016. Vol. 18(2). P. 68–71. ISSN 1335-4205.
22. Россолов О. До питання про критерій вибору раціональної схеми доставки вантажу. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2006. Т. 6, вип. 37. С. 101–102.
23. Stopka O., Černá L., Zitrický V. Methodology for measuring the customer satisfaction with the logistics services. *Nase More*. 2016. Vol. 63(3). P. 189–194. <https://doi.org/10.17818/NM/2016/SI21>.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 15.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Петров Л.М.

Військова академія

Петрик Ю.М.

Військова академія

Борисенко Т.М.

ТОВ «Агентство продажу активів»

ТЕОРІЯ Л.М. ПЕТРОВА З ДОДАТКАМИ Ю.М. ПЕТРИКА ТА Т.М. БОРИСЕНКА ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕОРЕМИ ЗМІНИ КІНЕТИЧНОГО МОМЕНТУ ЗАВАНТАЖЕНОГО КОЛІСНОГО РУШІЯ ВІЙСЬКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

Робочий процес кочення колісного рушія супроводжується деформуванням колісного рушія силою гравітаційного навантаження в зоні контакту з опорною поверхнею, що приводить до створення плеча кочення шляхом переміщення вектора дії гравітаційної складової в напрямку кочення колісного рушія. В статті розглянуті питання застосування теореми змінення кінетичного моменту для дослідження механічної системи «автомобільного колеса з деформованим в напрямку кочення протектором, з застосуванням теореми про зміну кінетичної та потенційної енергії в комбінованого колісному рушії, загального рівняння динаміки, а також рівняння Лагранжа другого роду.

В статті розглянуто кочення колісного рушія військового автомобіля, що поєднує традиційні розробки до колісних рушіїв з елементами сучасних розробок колісних рушіїв автомобілей.

Новизною застосованої теорії до рухомого автомобільного колеса є здатність накопичення та ефективного використання деформованої змінення конструкції шини, яка відбувається за дією зовнішньої сили і реалізація кутової швидкості, для забезпечення додаткової. Запропонована фізико-математична модель колісного рушія з деформованим протектором дозволяє кількісно описати зміну його енергетичного стану в процесі руху.

Розроблені теоретичні моделі конструкції колісного рушія в подальшому можуть слугувати для вдосконалення ходових систем вантажних транспортних засобів.

Вивчено рух колісного рушія в фазах відмінних одна від одної. Отримана математичні рівняння визначить залежність повного додаткового вивільнення стиснутої шини до початкового стану параметри. Дослідження показує, що в умовах бездоріжжя дана система значно підвищує прохідність та керованість транспортного засобу, а також поліпшити тягові можливості транспортного засобу.

Ключові слова: колісний рушії, транспортний засіб, зовнішня сила, маневреність, прохідність, динамічний рух, енергетичний стан.

Постановка проблеми. Вантажні автомобілі підвищеної прохідності переважно використовуються в важких дорожніх умовах, за яких ведучі колеса не спроможні забезпечити виконання необхідних вимог керованості. Тому данні вимоги потребують їх раціонального вирішення шляхом закладання у конструкцію інноваційних рішень.

З метою вдосконалення якісних показників ходової системи необхідно створити умови отримання запасу енергії, яка з'являється в наслідок деформації колісного рушія в деформованій час-

тині шини та реалізації її в процесі кочення колісного рушія при узгодженні її з плечем його кочення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різноманітні вимоги під час руху автомобіля м'якими вологими ґрунтами можуть вирішуватися за рахунок використання шин з глибоким малюнком протектору (ґрунтозацепами).

Для підвищення прохідності автомобіля по оранці, сильно розмоклій дорозі, піску або снігу застосовують шини з особливо широким профілем і низьким тиском повітря.

Сила зчеплення рушія з дорогою приблизно пропорційна довжині поверхні контакту. У звичайній автомобільній шини у контакті з дорогою є приблизно 8% довжини її кола, а у шини з регульованим тиском до 16%. Проте шини з регульованим тиском при мінімальному тиску мають обмежений пробіг. Прохідність автомобіля можна підвищити, збільшивши діаметр колеса. Так, на автомобілях високої прохідності встановлюють колеса діаметром 1,5–2 м, а на деяких спеціальних автомобілях до 3-х м. Коефіцієнт зчеплення ϕ_x шин з дорогою визначає прохідність автомобіля під час руху вологими ґрунтами і слизькою (обмерзлою) дорогою.

На (рис. 1) зображено шини для транспортних засобів з підвищеною силою тяги.

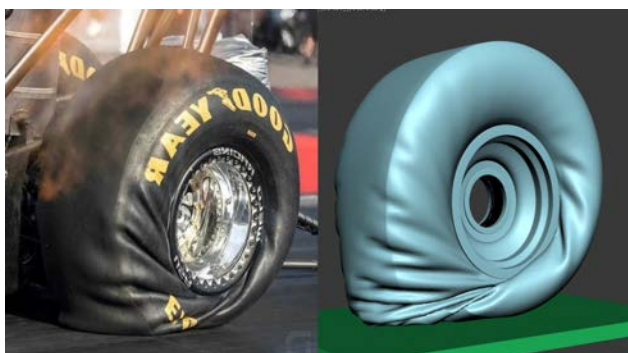


Рис. 1. Шини GOODYEAR для транспортних засобів з підвищеною силою тяги

Колія передніх і задніх коліс. При стисканні поверхні під час руху автомобіля м'якими ґрунтами створюється великий опір коченню коліс. Отже у разі неспівпадіння колії задніх та передніх коліс опір руху більший, ніж при їх співпадінні. Неспівпадіння колії ведених та ведучих коліс у автомобілів зі всіма односкатними колесами, так і автомобілів з передніми односкатними та задніми двоскатними колесами. Різниця передньої і задньої колії одинарних коліс не повинна перевищувати 25–32% ширини профілю шини. При більшій різниці прохідність автомобіля істотно знижується.

Підвіска. Рух автомобілів з колісною формою 6x4 і 6x6 по пересіченій місцевості без відриву коліс від ґрунту може бути обмежений максимально допустимим перекосом U_x мостів, який залежить від типу підвіски. При незалежній і балансирній підвісках допускається більший перекид мостів, що сприяє підвищенню прохідності [4, 5, 6].

Регулювання тиску повітря в шинах. Автомобілі, обладнані централізованою системою регулювання тиску повітря в шинах, за інших

рівних умов володіють підвищеною прохідністю під час руху м'якими ґрунтами. В цьому випадку при зниженні тиску повітря у шинах збільшується площа контакту колеса з дорогою, тобто забезпечується зниження тиску колеса на дорогу.

Наступає секціями зверху вниз, відкидаючи назад, отримуючи реакцію вгору-вперед. Виникають сили, що виштовхують рушій вгору – вперед [1].

На (рис. 2) показано режими роботи рушія: *a* – з відхиленими секціями на малий кут; *б* – з відхиленими секціями на великий кут [3].

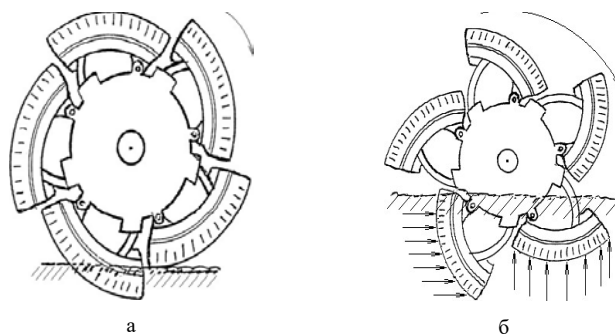


Рис. 2. Режими роботи рушія:
a – з відхиленими секціями на малий кут;
б – з відхиленими секціями на великий кут

Постановка завдання. Метою статті є створення математичної моделі ведучого колеса, що враховує вплив дії деформованої частини шини на тягові можливості колісного рушія та його динамічність, а це дозволяє оцінити ефективність використання зміненої конструкції шини під час використання в важких дорожніх умовах [2].

Виклад основного матеріалу. Для вирішення задачі отримання реальної кутової швидкості на автомобільному ведучому колесі застосовуємо теорему про зміну кінетичного моменту системи матеріальних точок відносно осі D ведучого колеса

$$\frac{d\bar{K}_0}{dt} = \sum_{k=1}^n m_0 (\bar{F}_k^e) \quad (1)$$

Приймаємо, що дана матеріальна система складається безпосередньо з колісного рушія А і деформованої частини шини В, а тому зв'язок між ними замінюємо силою F.

F – сила опору кочення колісного рушія;

P – сила тяжіння дія якої зміщена відносно центру колісного рушія на плече кочення α .

Усі зовнішні сили цієї складної системи наносимо на креслення (рис. 2).

Складаємо суму моментів відносно осі D:

$$\sum_{k=1}^n m_2 (\bar{F}_k^e) = P \cdot r \cdot \sin \alpha - Fr = P \cdot r \cdot \sin \alpha - P \cdot rf \cdot \cos \alpha = P \cdot r (\sin \alpha - f \cos \alpha) \quad (2)$$

де:

F – сила опору кочення колісного;

P – сила тяжіння ліній дії якої зміщена відносно осі D на плече кочення a .

Кінетичний момент системи, яка складається з колісного рушія та деформованої частини шини відносно осі O запишемо таким чином:

$$K_0 = K_0^{(1)} + K_0^{(2)} \quad (3)$$

Кінетичний момент колісного рушія відносно осі O :

$$K_0 = I_0 \cdot \omega$$

де

I_0 – момент інерції колісного рушія відносно осі обертання O .

В рівнянні (2) з'ясуємо, що:

$K_0^{(1)}$ – кінетичний момент колісного рушія;

$K_0^{(2)}$ – кінетичний момент деформованої частини шини.

Кінетичний момент деформованої частини шини буде мати вигляд:

$$K_0^{(1)} = I_0 \cdot \dot{\phi} \quad (4)$$

Кінематичний момент деформованої частини шини буде мати вигляд:

$$K_0^{(2)} = \frac{P}{g} V r = \frac{P}{g} r^2 \cdot \dot{\phi} \quad (5)$$

Формули (3) та (4) підставляємо у формулу (2)

$$K_0 = \left(I_0 + \frac{P}{g} r^2 \right) \cdot \dot{\phi} \quad (6)$$

Застосувавши теорему про зміну кінетичного моменту системи (1):

Колісний рушій та деформативна частина шини як сукупність матеріальних точок відносно осі D , отримаємо:

$$\left(I_0 + \frac{P}{g} r^2 \right) = \dot{\phi} \cdot r (sina - fcosa) \quad (7)$$

Підставивши в рівняння (1) отримуємо деформатійне рівняння:

$$\ddot{\phi} = \frac{P \cdot r (sina - fcosa)}{I_0 + \frac{P}{g} r^2} \quad (8)$$

Про інтегрувавши рівняння (8) знайдемо деформування швидкості кочення деформованого колісного рушія:

$$\dot{\phi} = \frac{P \cdot r (sina - fcosa)}{I_0 + \frac{P}{g} r^2} \cdot t + C_1 \quad (9)$$

Прийнявши початкові умови:

При $t=0$, $\dot{\phi}=0$ будемо мати $C_1=0$.

Отже кутова швидкість деформованого колісного рушія буде мати вигляд:

$$\dot{\phi} = \frac{Pr(sina - fcosa)}{I_0 + \frac{P}{g} r^2} \cdot t \quad (10)$$

На (рис. 3) показано можливий варіант руху деформованої частини шини особливої еластичності для підтримки її руху в особливих умовах експлуатації.

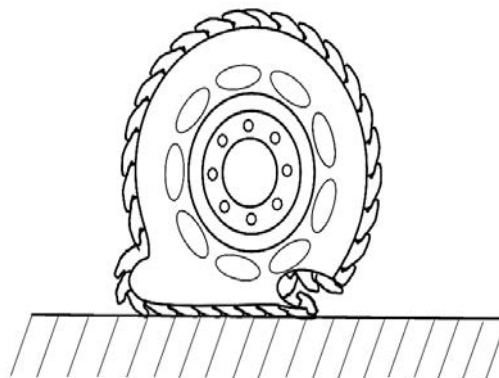


Рис. 3. Фізико-математична модель колісного рушія переведеного в деформований стан

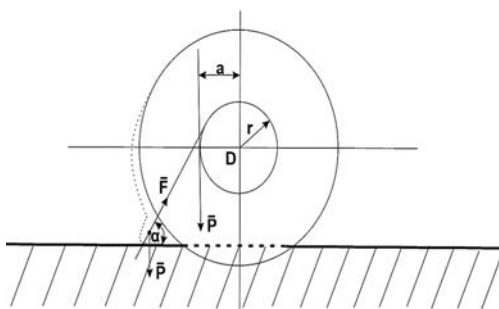


Рис. 4. Фізико-математична модель досліджуемого колісного рушія

Результати досліджень колісного рушія за теоремою зміни кінетичного моменту показані на (рис. 5).

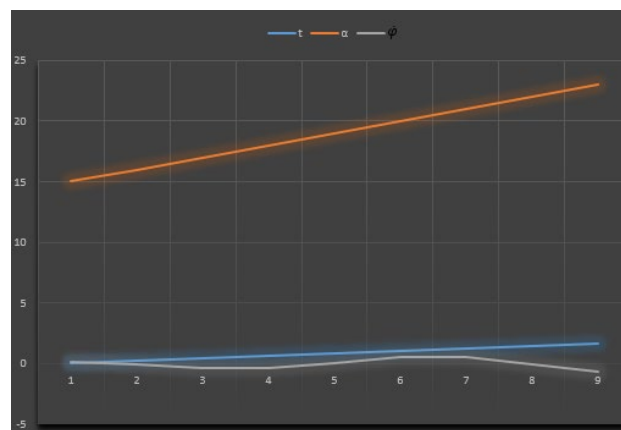


Рис. 5. Результати досліджень колісного рушія переведеного в деформований стан

Висновки. Виконані розрахунки показують, що запропонована теорія для колісного рушія дозволяє ефективно використовувати стиснуту частину шини в енергію, для підвищення тягових можливостей та динаміки розгону автомобіля. Таке врахування потенціалу деформованої частини шини надає змогу вдосконалити процес

переміщення автомобіля по заболочених місцях сипучим ґрунтам.

Отримана формула для кутової швидкості колісного рушія, дозволяє проаналізувати фізичні можливості руху колісного рушія за різних умов експлуатації, що в свою чергу дозволяє впровадження нових технологій в розробці ходової системи вантажних автомобілів.

Список літератури:

1. Скварок Ю.Ю. «Теорія автомобіля». Курс лекцій. 2009. 126 с.
2. Подригало М. А., Шелудченко В. В. Нове в теорії експлуатаційних властивостей автомобілів та тракторів. Сумський Національний аграрний університет Національна академія Національної гвардії України. 2015. 214 с.
3. Кубіч В. І. Особливості конструкції всюдихідних комбінованих колісних рушіїв: навчальний посібник. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 195 с.
4. Спосіб переміщення транспортно-тягової системи за допомогою поштовху колісного рушія: пат. 85848 Україна : МПК (2013.01) B62D 1/00. / u 2013 01295; заявл. 04.02.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23.
5. Лебедев А. Т. Трактори та автомобілі. Ч. 3. Шасі: Навч. посібник / А. Т. Лебедев, В. М. Антощенков, М. Ф. Бойко та ін.; За ред. проф. А. Т. Лебедева. Київ : Вища освіта, 2004. 336 с.
6. Петров Л. М., Осенчінін М. Г. Проект автомобільної системи із силовим збудженням коливань у технологічній платформі : Collective monograph. Riga : Izdevnieciba «BaltijaPublishing», 2020. С. 336–350.

Petrov L.M., Petryk Yu.M., Borisenko T.M. THEORY OF L.M. PETROV WITH ADDITIONS BY YU.M. PETRYK AND T.M. BORYSENKO USING THE THEOREM OF CHANGE OF KINETIC MOMENTUM OF LOADED WHEEL DRIVE OF A MILITARY VEHICLE

The working process of rolling a wheeled vehicle is accompanied by deformation of the wheeled vehicle by the force of gravitational load in the area of contact with the supporting surface, which leads to the creation of a rolling arm by moving the vector of action of the gravitational component in the direction of rolling of the wheeled vehicle. The article discusses the application of the theorem of change in kinetic momentum to study the mechanical system of an "automobile wheel with a tread deformed in the direction of rolling," using the theorem of change in kinetic and potential energy in a combined wheel drive, the general equation of dynamics, and the second-order Lagrange equation.

The article considers the rolling of a wheeled vehicle of a military vehicle, which combines traditional designs for wheeled vehicles with elements of modern designs for wheeled vehicles.

The novelty of the applied theory to a moving automobile wheel is the ability to accumulate and effectively use the deformed change in the tire structure, which occurs under the action of an external force and the realization of angular velocity, to provide additional energy. The proposed physical and mathematical model of a wheel drive with a deformed tread allows for a quantitative description of the change in its energy state during movement.

The developed theoretical models of the wheel drive design can be used in the future to improve the running gear of freight vehicles.

The movement of the wheel drive in different phases was studied. The obtained mathematical equations determine the dependence of the complete additional release of the compressed tire to its initial state parameters. The study shows that in off-road conditions, this system significantly increases the passability and maneuverability of the vehicle, as well as improving its traction capabilities.

Key words: wheeled drive, vehicle, external force, maneuverability, passability, dynamic motion, energy state.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 12.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Петров Л.М.

Військова академія

Котов Д.О.

Військова академія

Марченко В.П.

Військова академія

Ярошевський О.М.

Військова академія

Скремінський В.К.

Військова академія

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ПІДВИЩЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИМОГ ДО ВІЙСЬКОВИХ АВТОМОБІЛІВ

Незважаючи на значну увагу вчених та дослідників до вивчення взаємодії рухомого колеса з опорною поверхнею, у сучасному науковому середовищі недостатньо вивчається та досліджується питання теорії кочення деформованого колеса. Ця теоретична прогалина є суттєвою, оскільки ускладнює створення уніфікованих математичних моделей, здатних точно прогнозувати динаміку руху колісних транспортних засобів у всьому діапазоні експлуатаційних умов. На наш погляд, наразі недостатня увага приділяється критично важливому фізичному аспекту – вивченню та моделюванню розподілу нормальних реакцій у плямі контакту. Неточний опис плями контакту призводить до суттєвих помилок у розрахунках сил та енергетичних втрат. Коректне визначення цього несиметричного розподілу є детермінуючим фактором, оскільки саме зміщення рівнодійної нормальної сили відносно геометричної осі колеса створює момент опору коченню. Відповідно, дослідження кількісної залежності коефіцієнта опору кочення від різноманітних факторів є актуальним для сьогодення. Ця необхідність продиктована не лише академічним інтересом, а й підвищення загальної енергоефективності та паливної економічності автомобілів. Встановлено, що на величину коефіцієнта опору коченню впливає цілий комплекс взаємопов'язаних параметрів, які доцільно класифікувати за трьома основними, але взаємозалежними групами: конструктивні фактори – охоплює геометричні та структурні параметри шини, які безпосередньо впливають на форму хвилі деформації та її швидкість розсіювання енергії; технологічні фактори – які є первинними з точки зору гістерезисних втрат; експлуатаційні фактори – ці параметри відображають умови, в яких працює колесо. Зниження опору коченню є одним із ключових стратегічних напрямків оптимізації транспортних засобів. Комплексне вирішення цієї проблеми є необхідною передумовою для подальшого розвитку теорії колісних машин та ефективного інженерного проектування.

Ключові слова: колісний рушій, військовий автомобіль, коефіцієнт опору кочення, енергія, гравітаційна сила, маневреність, прохідність, динамічний рух.

Постановка проблеми. У роботі розглянуто аналіз проблем щодо реалізації якісних показників коліс автомобілів на основні проведення різноманітних стендових випробувань шляхом удосконалення та підвищення ефективності їх використання, а саме, шляхом заміни геометрії

елементів фізичних показників шини при її експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження вивчення факторів, які впливають на експлуатаційні показники автомобіля та визначають здатність і можливість його руху у різних

дорожніх умовах (у т.ч. бездоріжжям), долати різні перешкоди, опубліковано у роботах [1–6]. Тому питання покращення прохідності та підвищення керованості військового автомобіля впливає на ефективність виконання завдань за призначенням.

В роботі [7] автором розкриваються теоретичні положення моменту опору кочення.

Аналіз впливу повздовжньої сили та стабілізуючого моменту на взаємодію колеса з опірною поверхнею досліджено у роботі [8]. Питання кінематики та динаміка автомобільного колеса розглядаються у роботі [11]. Наукова праця [12] присвячена аналізу теоретичних та практичних аспектів, пов'язаних з працездатністю шин у процесі експлуатації автомобіля, включаючи дослідження деформації шини та опору кочення.

В роботі [13] авторами досліджується використання колісних дисків зі змінною шириною, що у свою чергу створює можливості у розвитку колісних рушіїв транспортних засобів.

Проаналізувавши результати наукових досліджень [1–14], можна зробити висновок, що велика увага приділяється питанням прохідності військових автомобілів, а саме, подоланням складних ділянок місцевості (рис. 1).

Аналіз останніх досліджень та публікацій показує, що вивчення та моделювання розподілу нормальних реакцій у плямі контакту є актуальною науковою задачею.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження та удосконалення розгляду деяких питань теорії кочення деформованого колісного рушія, особливо при різкій зміні значення опору кочення, переміщення точки дії гравітаційної складової у плямі контакту колісного рушія з опірною поверхнею в різних умовах експлуатації. Дане дослідження має на меті вивчення можливостей удосконалення конструкції та розвитку колісних рушіїв військових автомобілів. Практичне значення роботи полягає у покращенні прохідності та підвищення керованості військового автомобіля, що у свою чергу, впливає на ефективність виконання завдань за призначенням та безпеку руху.

Виклад основного матеріалу. Під час руху на колесо автомобіля діє складна система сил і моментів, зумовлена впливом зовнішнього середовища та факторами, що впливають з боку механізмів автомобіля. З одного боку, завдяки еластичним властивостям шин під час взаємодії з опірною поверхнею відбувається її деформація в різних напрямках. З іншого боку, опірною поверхнею також деформується. З співвідношення

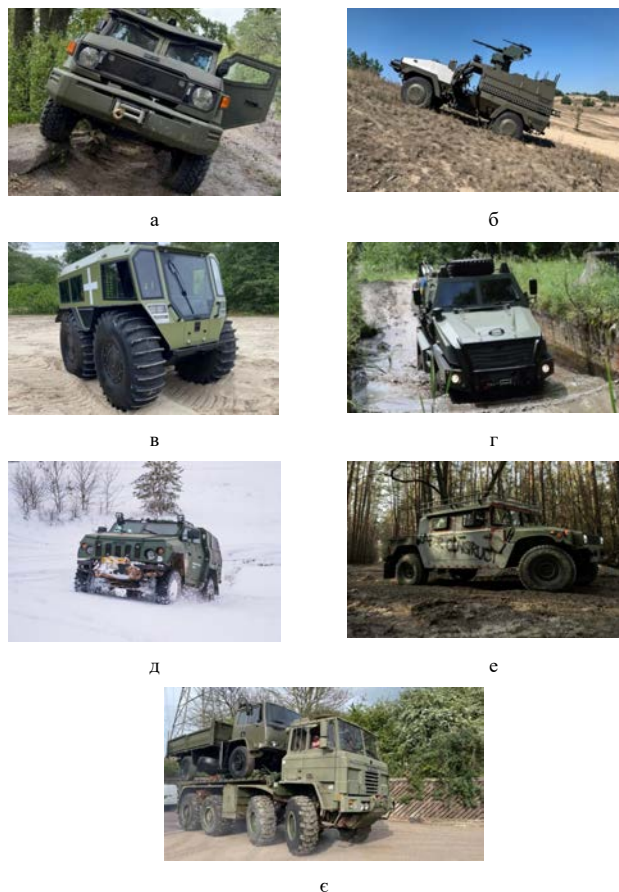


Рис. 1. Подолання військовими автомобілями складних ділянок місцевості: а – косогуру; б – підйому; в – піщаній ділянці; г – водної перешкоди; д – засніженої ділянки; е – багнюки; є – рух з великим навантаженням

деформації шини і ґрунту виділяють наступні моделі руху колеса (рис. 2): деформоване колесо по недеформованій поверхні, коли деформація ґрунту в багато разів менша за деформацію колеса (модель застосовується при коченні колеса по асфальтових і бетонних дорогах); недеформоване колесо по деформованій поверхні, коли деформація ґрунту значно перевищує деформацію шини (характерно при русі по пухкому снігу або сипучому піску, по болотистій місцевості); деформоване колесо по деформованій поверхні. Враховувати одночасну деформацію колеса і дороги необхідно в тому випадку, якщо величина цих деформацій співмірна.

Пневматична шина схильна до деформацій у трьох напрямках: виділяють радіальну (уздовж осі Z), окружну (навколо осі Y) і бічну деформацію (уздовж осі Y). Нормальне навантаження, що діє на шину, призводить до її радіальної деформації, внаслідок чого в області контакту колеса і дороги утворюється плоска область, площа якої характеризує здатність шини чинити опір нормальному

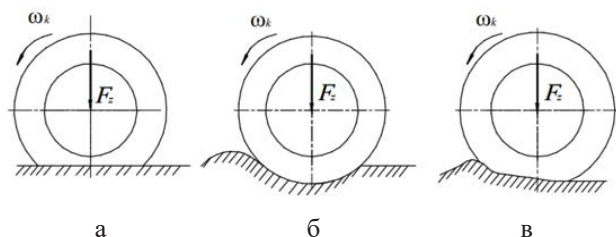


Рис. 2. Моделі руху колеса по опорній поверхні дороги: а – коло, що деформується по недеформованій дорозі; б – коло, що не деформується по деформованій дорозі; в – коло, що деформується по деформованій дорозі

навантаженню на коло. Без внутрішнього тиску жорсткості шини було б недостатньо для практичного використання, проте надлишковий тиск призводить до зменшення плями контакту і зниження демпфуючих властивостей шини. При коченні колеса по твердому ґрунту раніше деформовані ділянки плями контакту повинні повернутися до своєї нормальної форми, в той час як набігаючі ділянки шини повинні бути деформовані, щоб протистояти нормальному навантаженню на коло.

Нормальний прогин шини обернено пропорційний тиску в шині і збільшується пропорційно зростанню нормального навантаження. Залежність нормального прогину шини від нормального навантаження і тиску в шині визначається емпірично. Сила, що діє з боку автомобіля на коло, розкладається на дві складові: нормальну силу F_z – вага автомобіля, що припадає на коло; поздовжня сила F_x . Пляма контакту має форму, близьку до еліпса, витягнуту вздовж поздовжньої площини обертання колеса (рис. 3).

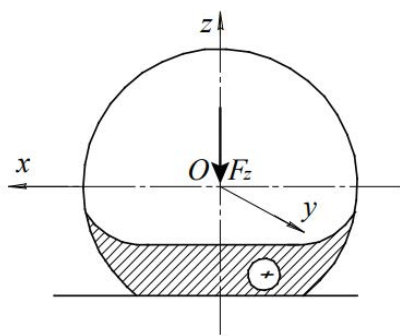


Рис. 3. Епюра деформацій стиснення, викликаних дією нормального навантаження

Збільшення тиску в шинах з 0,22 МПа до 0,24 МПа, як відмічено авторами у [10], знижує опір коченню приблизно на 10 відсотків. Опір коченню переважно визначається виробниками для нових шин, більшість з яких має коефіцієнт опору

коченню 0,007–0,014. З чого можна зробити висновок, що із навантаженням шини у 1000 Н опір коченню становить 7–14 Н. Товариством автомобільних інженерів (SAE) передбачено дві стандартні методики та протоколи вимірювання опору коченню шини – J2452 [10].

Коли коло нерухоме, вектор нормальної реакції розташовується в центрі плями контакту. При коченні колеса по опорній поверхні вертикальна реакція зміщується в напрямку його руху, утворюючи відносно осі обертання плече «а» відповідно до [7] (рис. 4), яке змінюється в залежності від умов експлуатації.

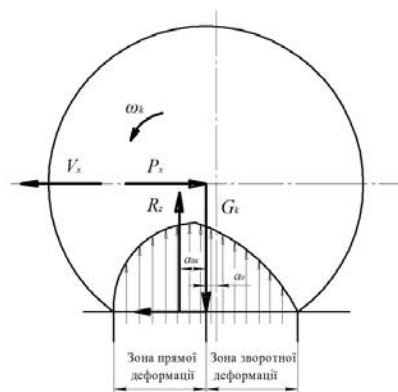


Рис. 4. Розподіл нормальних реакцій у плямі контакту

Зсув вектора нормальної реакції відносно осі обертання пояснюється в загальному випадку трьома факторами:

- 1) перерозподілом тиску в плямі контакту внаслідок гістерезисних втрат у шині;
- 2) поздовжнім зсувом самої осі колеса відносно плями контакту внаслідок деформації шини;
- 3) поздовжнім зсувом плями контакту внаслідок деформування опорної поверхні.

Відповідно до [7], зсув вектора нормальної реакції дороги R_z являє собою алгебраїчну суму 3-х зсувів:

$$a = a_u + a_o + a_n \quad (1)$$

Знос нормальної реакції відносно осі колеса створює момент опору коченню (M_f), який спрямований проти обертання та перешкоджає перекочуванню колеса по опорній поверхні [7] та надає можливість збільшувати чи зменшувати реалізацію моменту на колесі, тим самим підвищити дотичну силу тяги:

$$M_f = R_z (a_u + a_o + a_n) = R_{za} \quad (2)$$

Ведучі виробники свої удосконалення шин спрямовують на подолання моменту опору

коченню, що виникає при перекочуванні колеса по опорній поверхні, до нього необхідно прикласти крутний момент $M_k = M_f$ або повздовжнє штовхальне зусилля $P_x = \frac{M_f}{R}$ [7].

В автомобілів крутний момент прикладається до ведучих коліс, а штовхальне зусилля – до ведених [7].

Величина прикладання штовхального зусилля до осі ведених коліс, до яких прикладається сила опору кочення авторами у роботі [7] обчислюється за формулою:

$$P_f = \frac{M_f}{R_s} = \frac{R_{za}}{R_s} = R_{zf} \quad (3)$$

де $f = \frac{a}{R}$ – коефіцієнт опору кочення.

Сила опору кочення P_f , як слідує з висновків роботи [7] є фіктивна сила, яку більшість авторів використовує для кількісної оцінки опору коченню.

Автором роботи [8] розроблено загальну схему одержання аналітичних виразів для сили відведення та стабілізуючого моменту колеса на опорній поверхні (рис. 5).

У роботі [8] автором приведена теорія, що поперечні сили в плямі контакту визначаються у вигляді функції від повздовжньої координати точок, що лежать на відрітку середньої лінії, що перебуває в контакті з опорною поверхнею $-a < x < a$: у зоні відсутності проковзування (від точки $x = -a$ до точки x_1) – поперечні деформації ростуть за лінійним законом (деформації точки з поточною координатою x відповідає катет прямокутного трикутника $y_x = \tan(\alpha)(x + a)$, а відповідна елементарна поперечна сила $Y_x = C_y \cdot y_x$ (C_y – питомий коефіцієнт бічної жорсткості колеса) повинна бути меншою або рівною локальній силі зчеплення $\mu q_N(x)$; у зоні ковзання (від точки x_1 до точки $x=a$) реалізуються елемен-

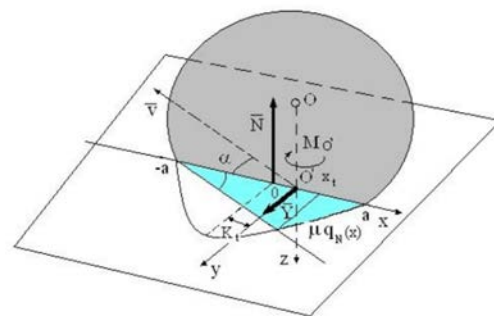


Рис. 5. Схема визначення поперечних елементарних сил у плямі контакту

Рівнодіюча елементарних поперечних сил Y, M – головний вектор моменту сил щодо полюса з координатою $x = K_t$, що повинно відбивати факт зсуву вертикальної реакції (K_t – коефіцієнт тертя кочення). Це, у свою чергу, призводить до виникнення інтервалу кутів відведення, на якому стабілізуючий момент міняє знак [8].

У роботі [14] авторами проведено аналіз випробувань різних типів шин, а саме: У 1982 – 83 роках товариство автомобільних інженерів (SAE) здійснило випробування різних типів шин, а дані про опір кочення стали загальнодоступними (табл. 1) [9], [12]. В табл. 1 показані результати дослідження коефіцієнта опору коченню пневматичних шин.

Дослідниками у роботі [14] були відібрані найбільш популярні шини, які на той час становили більш ніж 70 відсотків усього ринку. Протестовані шини були найбільш поширеного на той час розміру 195/75 з 14-дюймовим діаметром обода. Як видно з результатів таблиці 1 значення коефіцієнту опору кочення знаходиться у межах від 0,0098 до 0,0112 з середнім значенням 0,01082. Подальші

Таблиця 1

Результати дослідження коефіцієнта опору коченню пневматичних шин представлених на ринку у 1982–83 роках

№ п/п	Виробник	Модель	Коефіцієнт опору коченню	Середнє значення коефіцієнту опору коченню
1	BF Goodrich	Lifesaver XLM	0,0098	0,01082
2	Uniroyal	Steeler	0,01	
3	Firestone	Deluxe Champion Radial	0,0104	
4	Michelin	XMW	0,0105	
5	Montgomery	Ward Runabout	0,0106	
6	Uniroyal	Tiger Paw	0,0107	
7	Goodyear	Arriva	0,0109	
8	Goodyear	Custom Poly-Steel	0,011	
9	Delta	Durasteel	0,0111	
10	Firestone	721	0,0112	

Результати дослідження коефіцієнта опору кочення шин 2004 року випуску

№ п/п	Виробник	Модель	Коефіцієнт опору коченню
185/70/R14			
1	Bridgestone	B381	0,00615
2	Uniroyal	Tiger Paw AWP	0,0088
3	Sumitomo	HTR 200	0,0092
4	Goodyear	Integrity	0,0097
205/55/R16			
1	Continental	Conti Touring Contact CH95	0,0083
2	Michelin	Energy MXV4 Plus	0,009
3	Goodyear	Eagle RS A	0,0092
4	Bridgestone	Turanza LS-H	0,0109
245/75/R16			
1	Bridgestone	Long Trail T/A SL	0,0092
2	Michelin	LTX M/S	0,0103
3	Kumho	Venture AT	0,0105
4	Goodyear	Conquest AT	0,0114

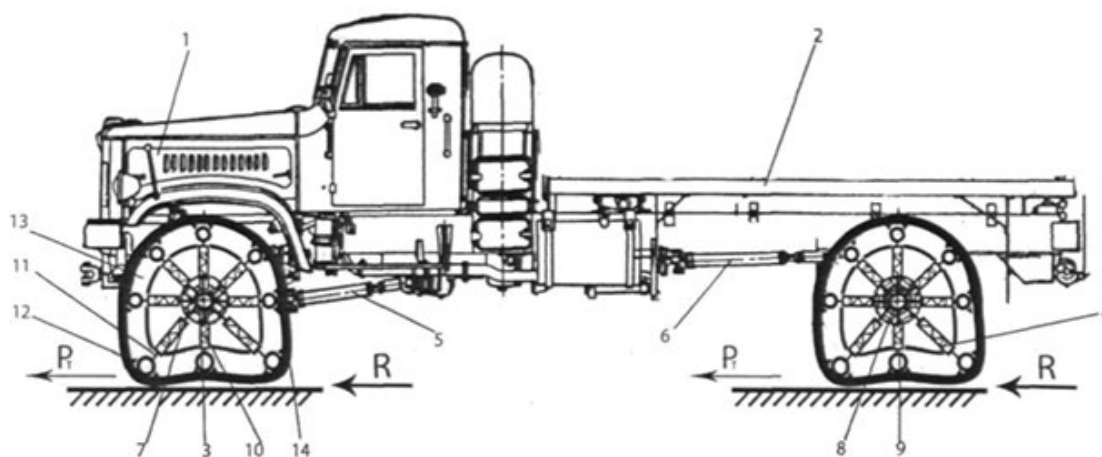


Рис. 6. Військовий автомобіль з модернізованими колісними рушіями

вимірювання коефіцієнта опору коченню проводились за аналогічними методиками, однак шини групувались за різними класами та призначенням. До групи шин для легкових пасажирських та легких вантажних автомобілів віднесено чотири розмірні ряди від 185/70R14 до P245/75R16. Вимірювання коефіцієнта опору коченню представлені в таблиці 2.

Висновки. Проведений аналіз робіт [1–14], на думку авторів, дає можливість оцінити втрати енергії, спричинені опором кочення для різних типів шин та дорожніх покриттів. Це має ключове значення для визначення запасу ходу електромобілів, а також розрахунку загальної витрати палива для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння. Проведений аналіз дасть змогу забезпечити введення точних вхідних параметрів

у математичні моделі руху транспортних засобів, що особливо актуально для вантажних та спеціальних автомобілів військового призначення та сприятиме підвищенню точності прогнозів щодо динаміки розгону, гальмування та максимальної швидкості транспортних засобів та реалізувати розробку практичних рекомендацій для водіїв стосовно оптимального тиску в шинах та вибору швидкостей руху, що дасть можливість ефективно зменшити вплив опору кочення.

Розглянувши запропоновані провідними фахівцями розробки колісних рушіїв, колективом авторів запропоновано нову конструкцію колісних рушіїв, якими можна обладнати автомобіль військового призначення [15]. В основу запропонованого колісного рушія автомобіля військового призначення, який дозволяє усунути недоліки,

розглянуті у табл. 1, 2. Поставлена задача може бути вирішена таким чином, що переміщення автомобіля буде включати передачу крутного моменту колісним рушієм та довантаження колісних рушіїв гравітаційною вагою, а зону кочення колісного рушія замінюють гнучким елементом, який буде підпружинений відносно маточини динамічною вагою. Динамічну вагу затискають між самим гнучким елементом та шиною колісного рушія з можливістю розтягу гнучкого елемента з зони плями контакту під дією динамічної ваги у напрямку, який протилежний руху автомобіля. Така технологія може бути використана на модернізованих колісних рушіях військового автомобіля КраЗ-5322 [15] рис. 6.

На рис.6 показано військовий автомобіль з модернізованими колісними рушіями. Автомобіль містить: двигун 1, раму 2, до яких приєднано ведучі мости (на кресленні не показано) та колісні

рушії 3 та 4. До ведучих мостів карданною передачею 5 та 6 підводять крутний момент. На маточині 7 та 8 колісних рушіїв 3 та 4 закріплюють рухомі ваги 9, які підпружинюють пружинами 10, і які встановлюють на штоках 11 і утримують від зміщення по колу колодками 12. Рухомі ваги 9, у радіальному напрямку, затискають між шиною 13 та гнучким елементом 14.

При переміщенні автомобіля рухомі ваги 9 в зоні плями контакту тиснуть на штоки 11 та стискають пружини 10. Шина 13 та гнучкий елемент 14 деформуються, пляма контакту шини з опорною поверхнею збільшується і при вивільненні деформованої частини шини на маточину 7 та 8 діє додаткова реакція опорної поверхні R. Додаткова реакція опорної поверхні складеться з силою тяги, яка діє на рушії від трансмісії автомобіля. Тим самим підвищується можливість автомобіля до більш повної реалізації крутного моменту.

Список літератури:

1. Склярів М. В., Яковлев О. В., Бондар Є. В., Коломицев В. М., Кашканов В. А. Аналіз впливу на прохідність автобронетанкової техніки конструктивних факторів та методика її збільшення шляхом автоматичного регулювання тиску повітря в шинах коліс. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. №19 (1). С. 150–156. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-150-156>.
2. Шаповалов О. І., Склярів, М. В. Математичне моделювання руху по деформованій опорній поверхні при зміні тиску в шинах коліс багатоцільового броньованого автомобіля на прикладі КраЗ “УРАГАН”. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2021. №1(37), С. 78–88. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2021/1/37/237881>.
3. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Купріненко О. М. Методологія оцінки опорної прохідності колісної військової автомобільної техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2019. №(4). С. 22–31.
4. Грубель, М. Г. Теоретичні основи моделювання взаємодії пневматичної шини автомобіля з бездоріжжям. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2019. №(3). С. 112–121. <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.61.14>.
5. Склярів М. В., Цебрюк І. В., Яковлев О. В., Бондар Є. В., Кашканов А. А. Математичне моделювання руху автобронетанкової техніки з колісною формулою 4×4 при зміні тиску в шинах коліс на прикладі КраЗ-Спартан. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. №19(1). С. 139–149. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-139-14916>.
6. Хітров І. О. Експлуатаційні властивості транспортних засобів. Навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2022. 176 с.
7. Біліченко В. В., Добровольський О. Л., Смирнов Є. В., Огневий В. О. Автомобілі. Теорія експлуатаційних властивостей. Лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2017. 86 с.
8. Єфименко А. М. Поліпшення поперечної стійкості колісного транспортного засобу шляхом вибору пружних характеристик колісних опор: дис.... канд. техн. наук: 05.22.02. Київ. 2016. 168 с.
9. Lee J. Interfacial Forces between Tire and Snow under Different Snow Depths. SAE WorldCongress. 2006. № 1. P. 19. URL: <http://papers.sae.org/2006-01-0496/> (дата звернення: 24.11.2025).
10. SAE International Recommended Practice, Stepwise Coastdown Methodology for Measuring Tire Rolling Resistance, SAE Standard J2452_201707, Revised July 2017, Issued June 1999. URL: https://doi.org/10.4271/J2452_201707.
11. Чабан С.Г. Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 133 Галузеве машинобудування з дисципліни «Експлуатаційні властивості колісних транспортних засобів». Одеса : ОНПУ, 2022. 186 с.
12. Ларін О.М. Теоретичні основи оцінки працездатності шин легкового автомобіля в експлуатації: Дис. докт. техн. наук. Харків, 2001. 312 с.

13. Петрик Ю.М., Петров Л. М., Котов Д.О., Шишкін Г.Б., Скремінський В.К., Ярошевський О.М. Спосіб покращення прохідності та підвищення керованості військового автомобіля за рахунок використання колісних дисків автоматичної змінної ширини. *Social Development and Security*. 2025. №15(3), 58–66. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.7>

14. «Методика та обладнання для дослідження коефіцієнта опору кочення автомобільних шин» URL: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/ABTOM_TRANSP/Авт_та_тракт_2020/Работы_студентов/Pnevmatychna_shyna.pdf (дата звернення: 24.11.2025).

15. Спосіб переміщення автомобіля «Деформований рушій»: пат. 137113 Україна. №201901378; заявл. 11.02.2019; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19. 4 с.

Petrov L.M., Kotov D.O., Marchenko V.P., Yaroshevskiy O.M., Skreminskiy V.K. RESEARCH ON THE CONDITIONS FOR IMPROVING AND IMPLEMENTING OPERATIONAL REQUIREMENTS FOR MILITARY VEHICLES

Despite the considerable attention paid by scientists and researchers to studying the interaction of a moving wheel with a supporting surface, the theory of rolling of a deformed wheel has not been sufficiently studied and researched in the modern scientific community. This theoretical gap is significant because it complicates the creation of unified mathematical models capable of accurately predicting the dynamics of wheeled vehicles across the entire range of operating conditions. In our opinion, insufficient attention is currently being paid to a critically important physical aspect the study and modeling of the distribution of normal reactions in the contact patch. An inaccurate description of the contact patch leads to significant errors in the calculation of forces and energy losses. Correct determination of this asymmetric distribution is a determining factor, since it is the displacement of the resultant normal force relative to the geometric axis of the wheel that creates the rolling resistance moment.

Accordingly, research into the quantitative dependence of the rolling resistance coefficient on various factors is relevant today. This need is dictated not only by academic interest, but also by the need to improve the overall energy efficiency and fuel economy of vehicles. It has been established that the rolling resistance coefficient is influenced by a whole range of interrelated parameters, which can be classified into three main, but interrelated groups: design factors – covering the geometric and structural parameters of the tire that directly affect the shape of the deformation wave and its energy dissipation rate; technological factors – which are primary in terms of hysteresis losses; operational factors – these parameters reflect the conditions in which the wheel operates. Reducing rolling resistance is one of the key strategic directions for optimizing vehicles. A comprehensive solution to this problem is a necessary prerequisite for the further development of wheeled vehicle theory and effective engineering design.

Key words: wheeled vehicle, military vehicle, rolling resistance coefficient, energy, gravitational force, maneuverability, cross-country ability, dynamic motion.

Дата надходження статті: 21.11.2025

Дата прийняття статті: 09.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 656.073.3
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/45>

Прокудін Г.С.

Національний транспортний університет

Назарова А.П.

Національний транспортний університет

Прокудіна І.І.

Національний транспортний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ

У статті розглядається модель аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів, яка представлена у вигляді мережі систем масового обслуговування. Ця мережа імітує технологічні процеси доставки вантажів від вантажовідправника до вантажоодержувача, забезпечує адекватне реагування на ситуації, що виникають у процесі її функціонування, і дозволяє коригувати значення окремих параметрів і характеристик мережі (кількість каналів, інтенсивність обслуговування і т. д.) з метою підвищення ефективності роботи мережі та забезпечення оптимального процесу обслуговування вимог щодо доставки вантажів у міжнародному сполученні.

Структура технологічного процесу доставки партії вантажу описується структурою логістичного ланцюга, що відбиває послідовність участі у процесі доставки різних суб'єктів ринку транспортних послуг. При цьому необхідно розрізняти задачу вибору оптимальної структури логістичного ланцюга та завдання вибору оптимального перевізника (логістичного оператора, підрядника на виконання окремих видів робіт, вантажного терміналу, контрольно-пропускного пункту тощо) або оптимального маршруту доставки. Вибір оптимальних варіантів логістичних ланцюгів доставки вантажів здійснюється на основі альтернативних варіантів, що багато в чому визначає ефективність вантажоперевезень.

У логістичному ланцюгу, що відображає технологічний процес доставки вантажів, циркулюють вантажопотоки, інформаційні потоки та фінансові потоки. Саме технологічний процес доставки вантажів з усіма його складовими моделюється з використанням математичного апарату теорії масового обслуговування як мережі систем масового обслуговування.

У статті представлено реалізацію моделі для аналізу логістичного ланцюга доставки вантажів у середовищі електронних таблиць Excel з метою знаходження середньої кількості вимог у мережі.

Ключові слова: вантажні перевезення, логістичний ланцюг, мережа систем масового обслуговування, оптимізація, середня кількість вимог, міжнародне сполучення.

Постановка проблеми. Суб'єкти транспортного ринку, що беруть участь у процесі доставки вантажів, і в першу чергу відправники вантажу, часом відчувають труднощі у виборі найбільш ефективного варіанту логістичного ланцюга (ЛЦ), а також кількісного складу її компонентів. Модель аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів, представлена у вигляді мережі систем масового обслуговування, імітує технологічні процеси доставки вантажів від вантажовідправника до вантажоодержувача, забезпечує адекватне реагування на ситуації, що виникають в процесі її

функціонування, і дозволяє коригувати значення окремих параметрів і характеристик мережі (кількість каналів, інтенсивність обслуговування та забезпечення процесу вантажів до інтенсивності обслуговування і т.д.) з метою підвищення міжнародне повідомлення (МС).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі Ширяєвої С.В. та Свіріна Д.О. [1] досліджено ланцюги поставок вантажів при міжнародних автомобільних перевезеннях вантажів, зокрема: принципова схема та загальна структура ланцюга поставок, основні типи ланцюгів поста-

вок та варіанти ланцюгів поставок. На жаль, зміст цих досліджень має узагальнений характер, не конкретизується і не відображає специфіку вантажоперевезень в СНД.

Автори Лиса С.С. та Зіміна А.І. [2] у своїй статті висвітлюють проблеми та перспективи розвитку ринку холодної логістики в Україні, а саме аналізують підходи до трактування понять «холодні ланцюги поставок», «холодна логістика» та «логістика вантажів, що швидко псуються», які можуть використовуватися як синоніми. Також розглядається питання управління холодними ланцюгами постачання та визначаються ключові логістичні рішення для ефективного управління. Надано оцінку поточного стану логістичного обслуговування холодних ланцюгів поставок в Україні. Стаття має виключно описово-статистичний характер.

У статті авторів Набокі Р.М. та Шукліної В.В. [3], присвяченої впливу інтеграції логістики поставок підвищення потенціалу підприємства, встановлено, що інтегрована логістика поставок дозволяє найефективніше реалізувати мети підприємства, сприяти виходу підприємства з економічної кризи. Зроблено висновок про те, що інтеграція логістики постачання дозволяє досягти синергетичного ефекту діяльності підприємства. Зміст статті має декларативний характер і не містить конкретних заходів щодо реалізації мети інтегрованої логістики поставок.

Постановка завдання. Метою статті є підвищення ефективності прийняття рішень під час управління логістичними ланцюжками доставки вантажів у МС.

Виклад основного матеріалу. Структура технологічного процесу доставки партії вантажу описується структурою ЛЛ, що відбиває послідовність участі у процесі доставки різних суб'єктів

транспортного процесу. Вибір оптимальних варіантів логістичних ланцюгів доставки вантажів складається на основі альтернативних варіантів, що багато чому визначає ефективність вантажоперевезень [4]. Розглянемо найпоширеніший варіант ЛЛ для доставки вантажів автомобільним транспортом у МС (рис. 1).

Для ЛЛ доставки вантажів початковою ланкою, що формує вантажопотік, є відправник вантажу (FO – *freight owner*), а кінцевою – отримувач вантажу (FC – *freight customer*). Фізичне переміщення вантажопотоку ($\rightarrow$) здійснюється перевізниками країни вантажовідправника A (C_1^A – *carrier*), причому спочатку перевізником C_1^A , який доставляє вантаж на вантажний термінал країни вантажовідправника FT^A (FT – *freight terminal*), а потім перевізником C_2^A від вантажного терміналу FT^A до митного поста (CP – *customs post*). У разі наявності у відправника вантажу власного рухомого складу він використовується замість перевізника C_1^A .

Функцію організації процесу переміщення вантажопотоків реалізує експедитор країни вантажовідправника A (FF^A – *freight forwarder*). Як організатор процесу реалізації потреби у переміщенні вантажу, експедитор є ланкою в ЛЛ, на якому замикаються інформаційні потоки ($\leftrightarrow$). Оскільки відправник вантажу для реалізації своєї потреби в переміщенні вантажу звертається до експедитора FF^A , то фінансові потоки ($\dashrightarrow$) в ЛЛ проходять, перш за все, від відправника вантажу до експедитора, а потім до інших учасників ЛЛ.

З'єднання ЛЛ на рисунку 1 країни одержувача B повністю симетричні з'єднанням ЛЛ країни відправника вантажу A і виконують самі теж функції, тобто:

$$FO \rightarrow C_1^A \rightarrow FT^A \rightarrow C_2^A \rightarrow CP \rightarrow C_1^B \rightarrow FT^B \rightarrow C_2^B \rightarrow FC$$

$$\dashrightarrow C_2^B \rightarrow FC.$$

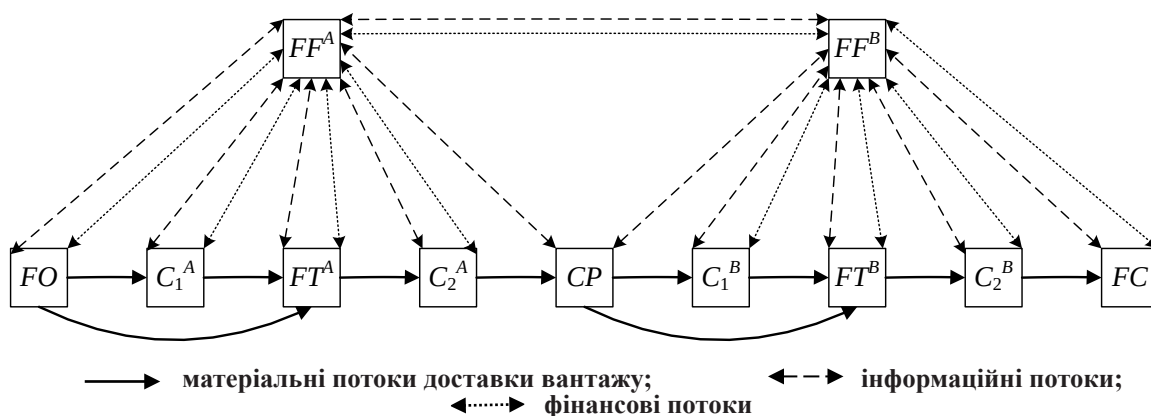


Рис. 1. ЛЛ доставки вантажів автомобільним транспортом у МС

Особливістю цих ланцюгів є те, що початкові та кінцеві ланки змінюються відповідно з FO на CP та з CP на FC , але функціонально вони ідентичні. Крім того, у цьому ЛЛ замість перевізника C_1^B може використовуватися перевізник C_2^A .

Для координації доставки вантажу від відправника FO до отримувача FC схема ЛЛ відображає інформаційні та фінансові зв'язки між експедиторами двох країн, а саме між FF^A і FF^B . Перевізники можуть доставляти партію вантажу від відправника до одержувача не тільки між двома країнами, а й між кількома. Для цього схема ЛЛ доповнюється зв'язками $CP \rightarrow C_1^X \rightarrow FT^X \rightarrow C_2^X \rightarrow FC$ відповідної країни X . Формально ЛЛ (LC – *logistics chain*) має наступну структуру:

$$LC = \{FO; FF^A; C_1^A; FT^A; C_2^A; CP; FF^B; C_1^B; FT^B; C_2^B; FC\} \quad (1)$$

де FO – вантажовідправник;

FF^A – експедитор в країні A ;

FF^B – експедитор в країні B ;

$C_1^A; C_2^A$ – перевізники в країні A ;

$C_1^B; C_2^B$ – перевізники в країні B ;

FT^A – вантажний термінал в країні A ;

FT^B – вантажний термінал в країні B ;

CP – пункт пропуску на митниці;

FC – вантажоотримувач.

Для розробки математичного апарату мережі системи масового обслуговування (СМО) [5] уявімо її можливі стани (рис. 2). Також для спрощення моделі вхідні потоки вантажних партій, що надходять до відправника вантажу і розподі-

ляються від отримувача вантажу, об'єднані в одне зовнішнє джерело (ЗД – 0), представлені на рис. 2. На основі рис. 2 побудована матриця передачі (2), що дозволяє визначити напрями інтенсивностей внутрішніх потоків у системі, де ЗД – зовнішнє джерело або середовище, а P_{ij} – ймовірність виходу заявки з i -ї системи в j -ю.

Прийнемо, що в матриці передач має місце:

$$\sum_{j=0}^M P_{ij} = 1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

де M – кількість СМО (у нашому випадку $M = 11$ з 0-им зовнішнім середовищем).

При цьому інтенсивність вхідного потоку становить:

$$\lambda_0 = \lambda_1. \quad (4)$$

З статистичних даних ймовірність використання орендованого автомобільного транспорту країни A , саме P_{13} , під час здійснення вантажоперевезень становить 10%, тобто. 0,1 або використання власного рухомого складу P_{14} (за наявності) – 30%, тобто. 0,3; використання експедитором FF^A країни A послуг перевізників C_1^A, C_2^A , вантажного терміналу FT^A , митного пункту пропуску CP і експедитора FF^B країни B оцінюється з такою самою ймовірністю, саме 20%, тобто. 0,2; ймовірність використання орендованого автомобільного транспорту країни B , саме P_{67} , під час здійснення вантажоперевезень становить 25%, тобто. 0,25, або використання власного рухомого складу P_{69} (за наявності) – 75%, тобто. 0,75; використання експедитором FF^B країни B послуг перевізників

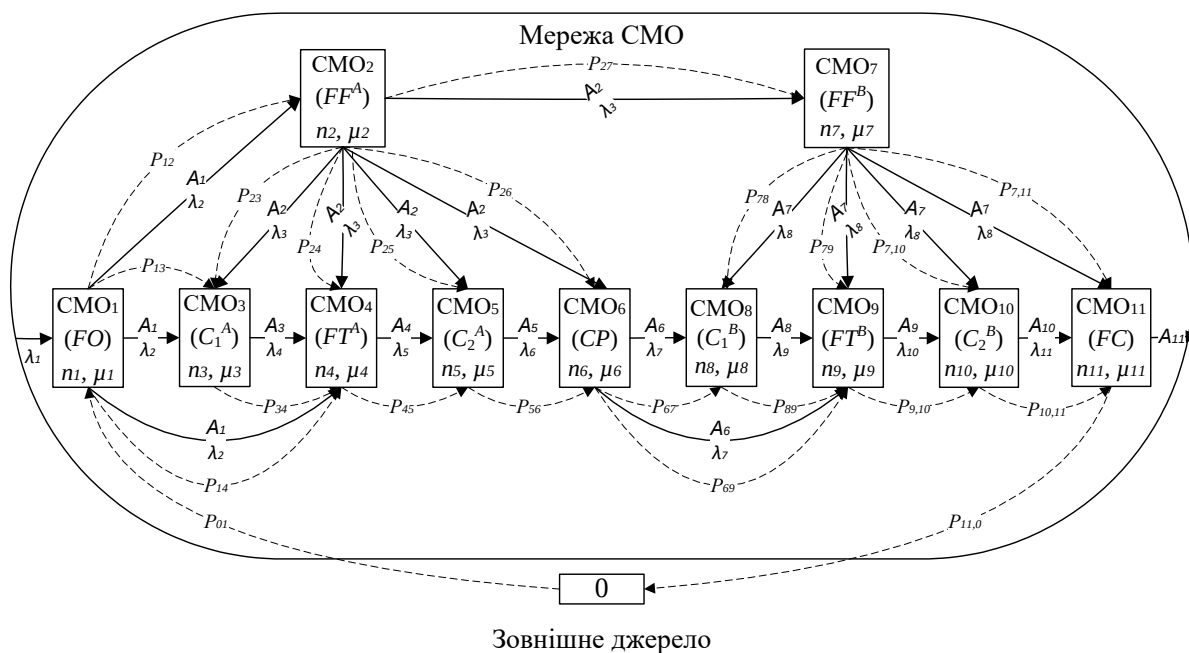


Рис. 2. Графи станів та передач мережі СМО

C_1^B , C_2^B , вантажного терміналу FT^B і одержувача FC оцінюється з однаковою ймовірністю – 25%, тобто, 0,25. Тоді, виходячи з (2)–(4), отримуємо:

$$\left\{ \begin{array}{lll} P_{12} = 0.6 & P_{67} = 0.25 & P_{9,10} = 1.0 \\ P_{13} = 0.1 & P_{69} = 0.75 & P_{10,11} = 1.0 \\ P_{14} = 0.3 & P_{78} = 0.25 & P_{11,0} = 1.0 \\ P_{23} = 0.2 & P_{79} = 0.25 & P_{01} = 1.0 \\ P_{24} = 0.2 & P_{7,10} = 0.25 & P_{34} = 1.0 \\ P_{25} = 0.2 & P_{7,11} = 0.25 & P_{45} = 1.0 \\ P_{26} = 0.2 & P_{56} = 1.0 & \\ P_{27} = 0.2 & P_{89} = 1.0 & \end{array} \right. \quad (5)$$

Передбачається, що ймовірність того, що запит, що виходить із системи i , буде направлений у систему j , не залежить від попереднього шляху цього запиту та стану мережі загалом. Отже, якщо існує стійкий стан, то

$$\lambda_j = \sum_{i=0}^M \lambda_i \cdot P_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (6)$$

У цьому виразі λ_0 позначає інтенсивність джерела. Звідки одержуємо:

$$\left\{ \begin{array}{lll} \lambda_1 = \lambda_0 \cdot P_{01} & \lambda_2 = \lambda_0 \cdot P_{23} + \lambda_4 \cdot P_{45} & \lambda_3 = \lambda_0 \cdot P_{69} + \lambda_7 \cdot P_{79} + \lambda_8 \cdot P_{89} \\ \lambda_2 = \lambda_1 \cdot P_{12} & \lambda_6 = \lambda_2 \cdot P_{26} + \lambda_5 \cdot P_{56} & \lambda_{10} = \lambda_7 \cdot P_{7,10} + \lambda_9 \cdot P_{9,10} \\ \lambda_3 = \lambda_1 \cdot P_{13} + \lambda_2 \cdot P_{23} & \lambda_7 = \lambda_2 \cdot P_{27} + \lambda_6 \cdot P_{67} & \lambda_{11} = \lambda_7 \cdot P_{7,11} + \lambda_{10} \cdot P_{10,11} \\ \lambda_4 = \lambda_1 \cdot P_{14} + \lambda_2 \cdot P_{24} + \lambda_3 \cdot P_{34} & \lambda_8 = \lambda_7 \cdot P_{78} & \end{array} \right. \quad (7)$$

Оскільки λ_1 відома, значення інших інтенсивностей можна знайти з допомогою системи рівнянь. Розрахувавши відповідні значення $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{11}$, можна за відповідних інтенсивностей $\mu_1, \dots, \mu_{11}$ (ширинах смуги пропускання СМО) отримати основні характеристики мережі СМО. Отримуючи ці характеристики, можна збільшувати чи зменшувати кількість каналів чи кількість місць у чергах очікування різних СМО з метою поліпшення її функціонування [6].

В результаті аналізу технологічних процесів доставки вантажів від відправника вантажу до його одержувача, пов'язаних з проходженням окремих ланок ЛЛ, а саме СМО (див. рис. 2), прийняті наступні позначення: СМО₁ (FO) – багатоканальна система без обмежень по черзі очікування; всі інші десять СМО, а саме СМО₂ (FF^I), СМО₃ (C_1^A), СМО₄ (FT^I), СМО₅ (C_2^A), СМО₆ (CP), СМО₇ (FF^B), СМО₈ (C_1^B), СМО₉ (FT^B), СМО₁₀ (C_2^B), СМО₁₁ (FC) – багатоканальні системи з обмеженою кількістю місць для очікування. Середній час виконання заявок у мережі СМО буде визначено:

$$\bar{t}_M^0 = \sum_{i=1}^m \bar{t}_{сист}^i, \quad (8)$$

де $\bar{t}_{сист}^i = \bar{t}_{чек}^i + \bar{t}_{обс}^i$, $i = \overline{1, M}$ (9)
де $\bar{t}_{сист}^i$, $\bar{t}_{чек}^i$, $\bar{t}_{обс}^i$, відповідно, середній час перебування вимоги в i -тій системі, середній час чекання в черзі чекання та середній час її обслуговування.

У цьому можна врахувати як структуру кожної системи, і її можливі втрати під час обслуговування. Для цього застосуємо відповідні формули [7]. Величини $\bar{t}_{сист}^i$ визначаються наступним чином:

1) Для СМО₁ – багатоканальної системи без обмежень на чергу чекання:

$$\bar{t}_{сист}^i = \bar{t}_{чек}^i + \bar{t}_{обс}^i = \frac{\bar{\tau}_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad \bar{\tau}_i = \frac{\rho_i^{n_i+1}}{n_i \times n_i!} \cdot \frac{P_0}{(1 - \chi_i)^2}, \quad i = 1; \quad (10)$$

$$P_0 = [1 + \frac{\rho_i}{1!} + \frac{\rho_i^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} + \frac{\rho_i^{n_i+1}}{n_i! \cdot (n_i - \rho_i)}]^{-1}, \quad (11)$$

де $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ – приведена інтенсивність вимог в i -тій системі;

$\chi_i = \frac{\rho_i}{n_i}$ – приведена інтенсивність вимог одного каналу в i -тій системі;

n_i – кількість каналів; P_0 – ймовірність відсутності у системі вимог.

Слід зазначити, що з систем без обмежень по чергах наявність стійкого режиму забезпечується за умови: $\rho_i < n_i$.

2) Для СМО₂, СМО₃, СМО₄, СМО₅, СМО₆, СМО₇, СМО₈, СМО₉, СМО₁₀, СМО₁₁ – багатоканальних систем з обмеженою кількістю місць для очікування:

$$\bar{t}_{сист}^i = \bar{t}_{чек}^i + \bar{t}_{обс}^i = \frac{\bar{\tau}_i}{\lambda_i} + \frac{q_i}{\mu_i}, \quad \bar{\tau}_i = \frac{\rho_i^{n_i+1}}{n_i \cdot n_i!} \cdot P_0 \cdot \frac{1 - (l_i + 1) \cdot \chi_i^{l_i} + l_i \cdot \chi_i^{l_i+1}}{(1 - \chi_i)^2}, \quad i = \overline{2, 11}; \quad (12)$$

$$P_0 = [1 + \frac{\rho_i}{1!} + \frac{\rho_i^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} + \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \cdot \frac{\rho_i / n_i - (\rho_i / n_i)^{l_i+1}}{1 - \rho_i / n_i}]^{-1}, \quad (13)$$

де l_i – кількість місць для очікування в черзі.

Середня кількість запитів у мережі визначається за формулою Літла:

$$\bar{z} = \bar{t}_M^0 \cdot \lambda_0. \quad (14)$$

Розроблена методика аналізу мережі СМО 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 покращення роботи мережі та забезпечення оптимального процесу обслуговування вимог на доставку вантажів у МС [8].

На рисунку 3 показана реалізація моделі аналізу ЛЛ доставки вантажів у середовищі електронних таблиць Excel для визначення середньої кількості вимог у мережі. Кількість каналів (від одного до трьох) та довжина черг очікування (від однієї до двох) у кожному СМО також використовуються як змінні параметри цієї моделі оптимізації. Результатом є значення середньої кількості вимог у мережі, що дорівнює 35 замовлень на годину при інтенсивності вхідного потоку замовлень 12 одиниць на годину.

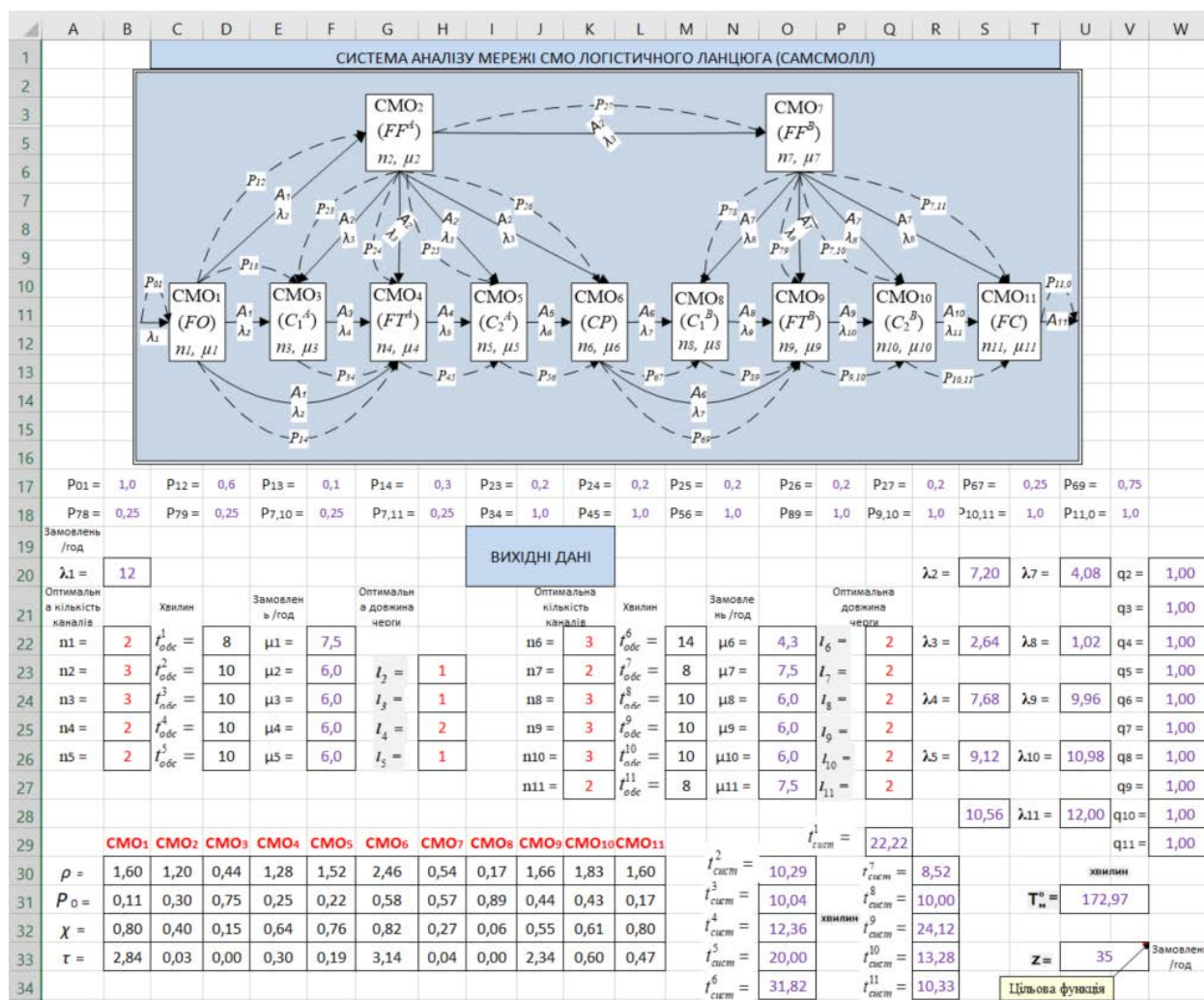


Рис. 3. Система аналізу мережі СМО ЛЛ доставки вантажів
(знаходження середньої кількості вимог, що знаходиться в мережі)

Запропонована модель аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів, представлена у вигляді мережі СМО, моделює технологічні процеси доставки вантажів від відправника вантажу до його одержувача та використовується у навчальному процесі кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету.

Планується реалізація цієї моделі за допомогою об'єктно-орієнтованої мови програмування. Після завершення досліджень планується передача розробленого методичного та програмного забезпечення до науково-консультаційного центру Асоціації міжнародних автомобільних перевізників України для використання у навчальному процесі підготовки управлінських кадрів автотранспортних підприємств транспортної галузі України.

Список літератури:

1. Ширяєва С.В., Свірін Д.О. Дослідження логістичних ланцюгів постачання при виконанні міжнародних автомобільних перевезень вантажів. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2017. Вип. 1 (37). С. 459–466. <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/37/459.pdf>
2. Лиса С.С., Зіміна А.І. Проблеми та перспективи розвитку ринку холодної логістики України. *Електронний науково-практичний журнал «Інфраструктура ринку»*. Причорноморський інститут економіки та інновацій, 2020. Вип. 44. С. 87–92. <https://doi.org/10.32843/infrastruct44-15>
3. Набока Р.М., Шукліна В.В. Вплив інтеграції логістичних ланцюгів поставок на підвищення потенціалу підприємства. *Електронне наукове фахове видання «Ефективна економіка»*. Дніпровський державний аграрно-економічний університет, ТОВ «ДКС Центр», 2020. Вип. № 4. С. 1–6. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.4.87>

4. Прокудін Г.С., Назарова А.П. Моделі альтернативних варіантів логістичних ланцюгів доставки вантажів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. Том 34 (73) № 2, 2023, С. 189–193. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/32>

5. Литвинов А.Л. Теорія систем масового обслуговування : навч. посібник; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.

6. Прокудін Г.С., А.П. Назарова, Т.Г. Хоботня, І.І. Прокудіна. Система аналізу мережі СМО логістичних ланцюгів доставки вантажів. *Міжнародна науково-практична конференція “Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології”*. С. 47–49. (21-22 листопада 2023 року). Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків. Україна.

7. Кунда Н.Т. Дослідження операцій у транспортних системах. *Навч. посібник для студ. напрямку “Транспортні технології” вищ. навч. закладів*. К.: Видавничий Дім “Слово”, 2008. 400 с.

8. 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». Вип. № 3 (57). 2023. С. 99–109. <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/57/099.pdf>.

Prokudin G.S., Nazarova A.P., Prokudina I.I. OPTIMIZATION OF LOGISTIC CHAINS OF CARGO DELIVERY IN INTERNATIONAL COMMUNICATION

The article considers a model for analyzing logistics chains for cargo delivery, which is presented in the form of a network of mass service systems. This network simulates the technological processes of cargo delivery from the consignor to the consignee and provides for an adequate response to situations arising during its operation and allows adjusting the values of certain parameters and characteristics of the network (number of channels, service intensity, etc.) in order to improve the network operation and ensure the optimal process of servicing requirements for cargo delivery in international traffic.

The structure of the technological process of delivering a consignment of cargo is described by the structure of the logistics chain, which reflects the sequence of participation in the delivery process of various transport market entities. In this case, it is necessary to distinguish the task of choosing the optimal structure of the logistics chain from the task of choosing the optimal carrier (logistics operator, contractor for performing certain types of work, cargo terminal, checkpoint, etc.) or the optimal delivery route. The selection of optimal options for logistics chains of cargo delivery is carried out on the basis of their alternative options, which largely determines the efficiency of cargo transportation.

In the logistics chain, which reflects the technological process of cargo delivery, cargo flows, information flows and financial flows circulate. It is the technological process of cargo delivery with all its components that is simulated using the mathematical apparatus of the theory of queuing in the form of a network of queuing systems.

The article presents the implementation of a model for analyzing the logistics chain of cargo delivery in the Excel spreadsheet environment in order to find the average number of requirements in the network.

Key words: cargo transportation, logistics chain, mass transit system network, optimization, average number of requirements, international connection.

Дата надходження статті: 11.11.2025

Дата прийняття статті: 02.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 656.065.3
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/46>

Прокудін Г.С.

Національний транспортний університет

Катрушенко Н.А.

Національний транспортний університет

Прокудіна І.І.

Національний транспортний університет

Даніва В.А.

Національний транспортний університет

Салада А.Т.

Національний транспортний університет

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОМЕТАНУ НА ВАНТАЖНОМУ ТРАНСПОРТІ УКРАЇНИ

У статті розглянуто аналіз екологічних, економічних та логістичних аспектів використання біометану у вантажному транспорті України. Досліджено порівняльні показники викидів парникових газів різних видів палива, собівартість виробництва біометану, його переваги та недоліки в експлуатації, результати тестування біометанових вантажівок, а також проблеми транспортування сировини для біогазових установок.

У сфері біометану залишаються актуальними проблеми, пов'язані з українським законодавством, яке не готове до нових викликів. Україна експортує велику кількість сировини для біопаливних заводів Європи, не використовуючи ці ресурси для власних потреб. Водночас імпортує викопні види палива, через що втрачає додану вартість, енергонезалежність, засмічуючи екологію. Відсутність реєстру біометану, обмеження експорту природного газу українського походження, відсутність базового закону щодо виробництва та споживання його на транспорті – зупиняє розвиток сектора, надаючи йому вирости та стати конкурентоспроможним. Можливими шляхами подолання такої ситуації є запуск у експлуатацію реєстру біометану, розроблення проєкту Закону України щодо його використання як моторного палива, включення до Національної енергетичної стратегії цілей споживання, а також цілей щодо кількості газових заправних станцій. У довгостроковій перспективі впровадження ринку біометану в економіку України, значно підвищить потенціал у сфері міжнародних перевезень. Інтеграція екологічних стандартів, та запровадження підтримки виробникам можуть покращити ситуацію перевізників на європейському середовищі. Формування внутрішнього ринку споживання біометану сприятиме створенню нових робочих місць, модернізації інфраструктури, зниженню залежності економіки, що стратегічно важливо у контексті євроінтеграційних процесів.

Ключові слова: біометан, біопаливо, логістика, відновлювальна енергетика, транспортний сектор, викиди парникових газів, економічна ефективність, зелені технології, біоенергетика, альтернативне паливо, енергетична безпека, сталий розвиток.

Постановка проблеми. На тлі економічної нестабільності, та постійного коливання цін на ринку енергоносіїв, виникла необхідність впровадження альтернативних джерел енергії, для сталого розвитку та відокремленості від звичного нам викопного палива. Такі засоби існують не один рік, але через брак ресурсів та підтримки

держави, вони відійшли на задній план, залишаючись позбавленими уваги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика розвитку біоенергетики, зелених логістичних підходів та виробництва екологічних видів палива представлена у працях зарубіжних і українських науковців. У літературі висвітлено

екологічні переваги біопалив, оцінку викидів GHG (Greenhouse Gas – парникові гази), економічні аспекти виробництва та перспективи заміщення викопного палива. Дослідження European Biogas Association та UABIO (біоенергетична асоціація України) демонструють значний потенціал України у виробництві біометану, проте акцентують на низькому рівні його фактичного використання.

Для сталого розвитку та реалізації таких технологій, що могли б збільшити кількість робочих місць, в перспективі зменшити собівартість перевезень та зробити їх безпечнішими та екологічнішими, мало людей замислюються з приводу просування так званої «зеленої логістики».

Те, що ми зараз називаємо «зеленою логістикою», являє собою конвергенцію кількох напрямків досліджень, які розпочалися в різний час: зменшення зовнішніх ефектів вантажних перевезень, міська логістика, зворотна логістика, корпоративні екологічні стратегії щодо логістики та управління зеленим ланцюгом поставок [1]. Розвиток біотехнології пропонує можливості для революціонування широкого портфолію продуктів з енергетичного, хімічного, фармацевтичного, сільськогосподарського та харчового секторів і допомагає трансформувати сучасну економіку, що базується на викопному паливі, в біоекономіку [2]. Основним критерієм екологічності в транспорті є паливо-мастильні, яке перетягує на себе більшу частину викидів. В наш час існують альтернативи викопному паливу – це біопаливо.

Біопаливо – це джерела енергії, отримані з біологічних матеріалів, що відрізняє їх від інших джерел енергії, не пов'язаних з викопним пали-

вом. Біопаливо може бути твердим, рідким або газоподібним, і всі три форми енергії є стійкими та відновлюваними, оскільки вони виробляються з рослин і тварин, і тому можуть бути замінені за короткий проміжок часу [3].

Виклад основного матеріалу. Україна залежна від викопного палива на понад 80%, що негативно впливає на довкілля. За даними *Biotechnol Environ* різні палива мають різну ступінь GHG. До прикладу біоетанол може вироблятися як з цукрової тростини, так і з кукурудзи, але GHG буде різний – 35 г CO₂е/MJ (конкретне значення вказує на те, що для виробництва, транспортування та споживання кожного мегаджоуля (MJ) енергії в атмосферу викидається 35 г парникових газів в еквіваленті CO₂ (оцінка життєвого циклу палива) та 76 г CO₂е/MJ відповідно. Для порівняння, стандартний бензин це приблизно 90 г CO₂е/MJ. Біоводень коливається в межах від +30 до +60 г CO₂е/MJ, а біометан не перевищує -70 г CO₂е/MJ [4]. Від'ємне значення цього параметру для біометану означає, що у процесі його використання атмосфера очищається від вуглекислого газу). На рисунку 1 розглянуто більш детально весь спектр сфери палива.

В наших реаліях це не тільки покращення екології, а ще й вигідна економічна пропозиція, яка могла б покращити ситуацію на ринку логістики.

Найперспективнішим паливом на даний момент є біометан, так як його виробництво відбувається цілий рік та з відходів які не потребують високих вкладень, таких як гній, силос, жом, залишки з переробленої олії т.п, через що його собівартість становить 0,15–0,40 євро за м³, на відміну від біодизеля та біоетанолу з сезонністю

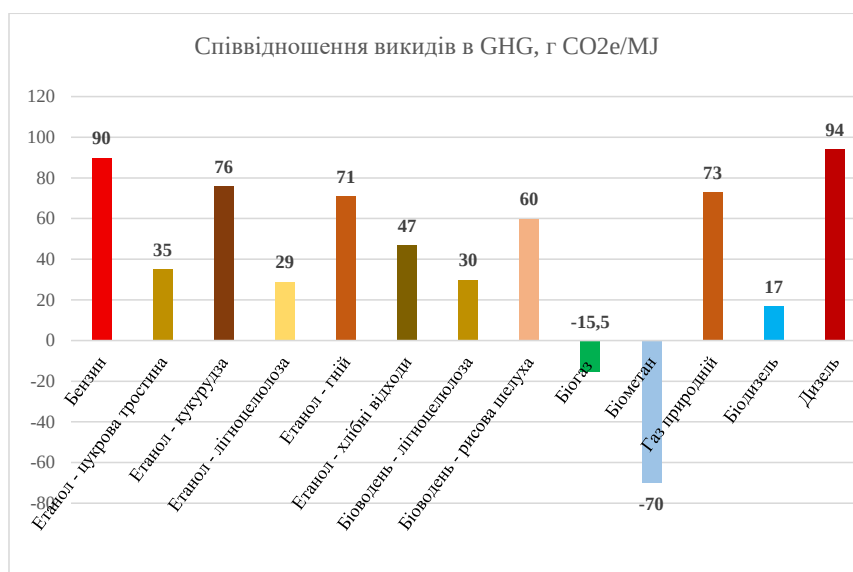


Рис. 1. Співвідношення викидів в GHG, г CO₂е/MJ

вироблення та собівартістю 0.80–1.50 євро за літр та 0.50–1.00 євро за літр відповідно. Біометан можна заправляти в якості альтернативи звичайному природному газу, без втрати потужності. Це змогли довести нещодавнім експериментом автобудівельної компанії IVECO, чия вантажівка подолати 5 000 км на біометані, продемонструвавши ключову роль цього пального в стійкому вантажному транспорті [5]. Ця подія відбулась 1 липня 2025 року, після якої вони довели, що біометан – за підтримки партнерської мережі та технологічних інновацій – є реальним і негайним кроком до вуглецево-нейтрального майбутнього у вантажному транспорті.

Для того щоб дизельна вантажівка (або будь-яка інша) могла заправлятися таким видом палива, на даний момент треба встановити спеціальну установку. Ціна такої конструкції в районі 25–45 тис €, що може стати проблемою, але економія є значною приблизно пів мільйона гривень на рік (10 тис €). Висновки зроблені на основі розрахунків, за умови що пробіг автопоїзда на рік складає 100–120 тис км та споживання палива 28–35 л дизеля на 100 км або еквівалент 22–27 кг біометану. Ціна палива складає для дизеля 52–55 грн л, а для біометану 35–42 грн/кг. В середньому ціна заправки дизелем вантажівки на рік становить:

$$110\,000_{\text{км}} \times 0,3 \frac{\text{л}}{\text{км}} \times 53 \frac{\text{грн}}{\text{л}} = 1\,749\,000 \text{ грн / рік}; \quad (1)$$

на протипагу біометану:

$$110\,000_{\text{км}} \times 0,26 \frac{\text{л}}{\text{км}} \times 40 \frac{\text{грн}}{\text{л}} = 1\,144\,000 \text{ грн / рік}. \quad (2)$$

Тобто економія складає 605 000 грн/рік (12 000 €). Також вагомою проблемою залишається окупність проекту. Якщо ми кажемо що установка коштує 35 000 € то її окупність буде складати $35\,000 : 12\,000 \approx 3,3 \text{ роки}$. Іншою справою буде якщо біометан власного виробництва, собівартість якого буде складати 20–25 грн/кг, тоді економія буде вдвічі більшою, через що окупність складатиме 1,5–2 роки. Також через чистий хімічний склад (вода+CO₂) без сірчистих сполук, відсутності кислот, що властиві дизелю, та за відсутності сажі/сажових часток, має меншу агресивність щодо металу, резини, мастила та інших матеріалів, через що обслуговування вантажного транспорту стає менш затратним.

Не дивлячись на те що в такої технології є багато плюсів, як з економічної сторони, так і з екологічної, залишається один критичний мінус – і це втрата вантажопідйомності. Хоча така конструкція не займає додаткових вантажних

місць, маса можливого підйому вантажу скорочується на 300–900 кг, що є значним у дальніх перевезеннях.

Зважаючи на те що Україна аграрна країна, ми маємо високий потенціал до виробництва біометану, який оцінюється у 21.8 млрд м³ на рік [6]. На даний момент маємо 4 біометанових заводів та 85 біогазових загальною потужністю 41 млн м³ біометану на рік, а ще три заводи планують ввести в експлуатацію найближчим часом до кінця року, що збільшить річне виробництво біометану в Україні до 111 млн м³ [7]. В порівнянні з минулим роком кількість продукції, що виробляється збільшилась на 30 млн м³, що є значним досягненням в новій сфері, хоча така кількість не покриє потреби ринку вантажних перевезень [8]. Орієнтовна потреба вантажного транспорту становить 1 млн тонн дизеля на рік (консервативна оцінка), отже якщо ми візьмем енергетичний еквівалент як 41 млн м³ біометану до 41 млн л (41 тис тон) дизеля вийде відповідний розрахунок:

$$\frac{41\,000_{\text{тон}}}{1\,000\,000_{\text{тон}}} \times 100\% = 4,1\%. \quad (3)$$

Тобто приблизний дефіцит становить 95.9%, що є проблематичним в досягненні повної автономності від звичного нам дизеля. Для того щоб забезпечити ринок стабільним постачанням біометану нам треба виробляти його в рік приблизно 1.2 млрд м³. До такого висновку приводять наступні розрахунки. Для початку з'ясуємо скільки літрів дизеля в одній тонні, для цього визначаємо щільність дизеля 0,832 кг/л. Тоді маємо наступне рівняння:

$$1\,000_{\text{кг}} : 0,832 \frac{\text{кг}}{\text{л}} = 1,201\,923\,0769 \text{ л}. \quad (4)$$

Отже в результаті отримаємо 1 т дизеля це приблизно 1202 л. Переводимо річну потребу (тони) у літри. Якщо в рік 1 000 000 т, то в результаті маємо вираз:

$$1\,000\,000 \times 1\,201,923\,0769 \text{ л} = 1\,201\,923\,076,9 \text{ л} \quad (5)$$

Вважаємо, що 1 м³ біометану $\approx$ 1 л. дизеля за енерговмістом (тобто 1 м³ $\approx$ 10 кВт год – це загальне наближення). Тобто, щоб замінити 1 201 923 077 л дизеля, потрібно 1 201 923 077 м³ біометану. Це все є приблизні результати, але вони в повній мірі показують теперішню ситуацію на ринку. Знизу представлений розрахунок перспектив на ринку біометану та в якому році зникне дефіцит з теперішнім зростанням його об'єму (рис. 2).

Як представлено на графіку дефіцит зникне приблизно до 2036, що дасть змогу повністю забез-

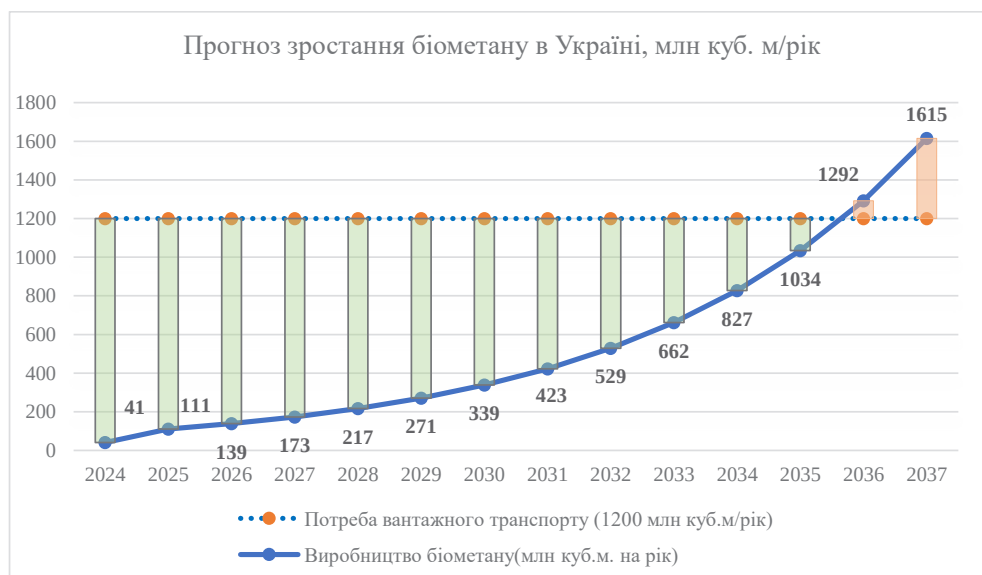


Рис. 2. Прогноз зростання виробництва біометану в Україні

печити потреби країни. Тенденції зростання обрані з факту, що в ЄС за останні роки виробництво біометану щороку збільшується на 25-30%, а в Україні за рахунок інвестицій та нових біометанових заводів планується щорічне зростання близько 25%.

Індустрія в Україні почала працювати в 1993, але це був поодинокий випадок встановлення біогазової установки на свинофермі «Запоріжсталі». Безпосереднє виробництво біометану почалось нещодавно в 2023 на Чернігівщині «Галс Агро» [9]. З цього можна зробити висновок що вироблення такого біопалива для нас є новим та стрімко розвиваючимся сектором, з великою кількістю проблем, як в транспортуванні так і в використанні цього продукту. Через брак досвіду та практичних напрацювань, мало людей розуміється на потребах цієї сфери, що в результаті призводить до збитків.

Транспортування матеріалів для виготовлення біогазу, є основною проблемою зі сторони логістики. На даний момент українському ринку критично не вистачає силосних причепів з можливістю герметизації, через що транспортування такого роду вантажів відбувається в самоскидах, та іншому непідлаштованому виді транспорту, що призводить до проблем з розгрузкою та додаткових витрат на обслуговування вантажівки. Звісно деякі заводи мають власний транспорт, але це тільки наслідки нестачі забезпечення логістичних фірм. Ця проблема торкається не тільки біопалива, а зокрема і агрохолдингів, які виробляють корми. Таких холдингів в країні більше 100, що робить нестачу причепів суттєвою як для виробників так і для логістики.

Візьмемо реалістичний приклад для таких господарств: середня ціна кукурудзяного силосу у 2025 році становить 2500 грн/т, перевезення 20т здійснюється на причепі. При відкритому кузові втрати встановлюють: вітрові – 1-3% (видування дрібних частинок), вологістні – 2-4% (пересушування, втрата ферментованої активності), атмосферні (дощ, сніг, забруднення) – 0.5-1%. Разом такі втрати становлять близько – 4-8% маси всього вантажу. Таким чином збитки від одного рейсу становлять від 2 до 4 тис. грн, виходячи з розрахунків:

$$2500 \text{ грн} \times 0,04\% = 100 \text{ грн} \text{ та } 2500 \times 0,08\% = 200 \text{ грн} \text{ відповідно (6)}$$

Якщо господарство перевозить 1000 т силосу за сезон (50 рейсів по 20 тон) мінімальні втрати будуть становити від 100 000 грн/сезон до 200 000 грн/сезон. Для фермерства це значні суми, які можна було б уникнути за умови достатньої оснащеності ринку. Логістичні збитки становлять близько 625 000 000 грн/рік через брак оснащеності. Щорічне перевезення силосу та подібних кормів становить 5 млн т, за середню ціну 2 500 грн/т, без герметизації середні втрати становлять 5%. З цього випливає розрахунок:

$$5\,000\,000 \text{ т} \times 2\,500 \text{ грн} / \text{т} \times 0,05\% = 625\,000\,000 \text{ грн} / \text{рік. (7)}$$

З результатів випливає, що ця прогалина є дуже значною та не звертання на неї уваги призводить до втрати заробітку. На даний момент ця ніша майже не має конкурентів, тому після деяких вкладень в перспективі призведе до неминучого успіху. Аналіз даної ситуації представлений на рисунку 3.

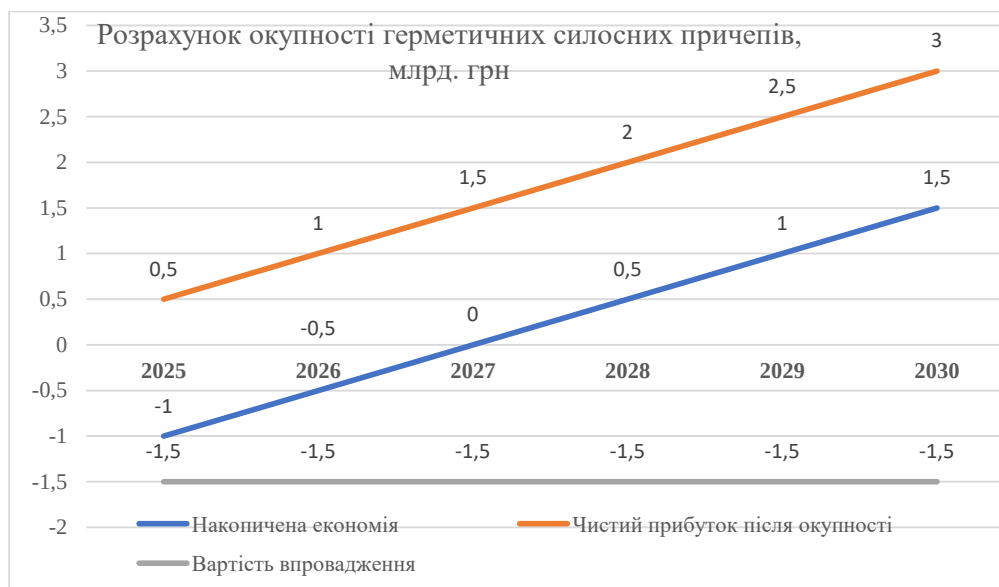


Рис. 3. Розрахунок окупності герметичних силосних причепів, млрд. грн

Графік показує, що при економії близько 500 млн/рік закупівля герметичних силосних причепів на 1,5 млрд грн окупиться приблизно за 3 роки, а далі сектор отримуватиме чистий прибуток, який за 6 років перевищить 1,5 млрд грн.

Проблеми в перевезеннях наявні не лише з силосом, а й з відходами цукрових, спиртових, пивних заводів, відходів гідратації олії на маслоекстракційних заводах, для яких також немає відповідного транспорту, їм міг би підійти саме цей причіп, що у свою чергу розширює ринок та збільшує рентабельність.

Висновки. Не дивлячись на всі переваги цього напрямку, держава не сприяє його розвитку. Відсутність затверджених довгострокових цілей з розвитку біоенергетики та необхідність сплачувати податок за викиди CO₂ для котельень, ТЕЦ/ТЕС на біомасі і біогазі, призводить до стагнації цього сектору.

Невизначена державна позиція, щодо енергетичного використання сільськогосподарських залишків, спалювання лісосічних відходів в лісі та відсутність їх збирання, не дає збільшувати обертів виробництва, що погіршує розвиток «зеленої» економіки. Високі вимоги Директиви ЄС RED II щодо скорочення викидів парникових газів (ПГ) для нових установок з виробництва рідких біопалива і біогазу для транспорту – 65% для установок, що

почали роботу з 01.01.2021 та обмежений список сировини, для виробництва передового біопалива, знижують зацікавленість потенційних реалізаторів та ускладнюють роботу існуючим. Відсутність аукціонів з державної підтримки проектів з виробництва електроенергії з ВДЕ (відновлювальні джерела енергії). Ці проблеми стосуються всього сектору біоенергетики, створюючи несприятливі ситуації для розвитку сфери. Рішенням такого виду проблем є: затвердити Дорожню карту розвитку біоенергетики до 2050 р. або включити довгострокові цілі по біоенергетиці в оновлену Енергетичну стратегію до 2050 р.; звільнити від сплати податку за викиди CO₂ установок, що спалюють тверде біопаливо і біогаз; відтермінувати для України жорстку вимогу щодо скорочення викидів парникових газів (65%). В ЄС працює багато установок, що почали роботу до 05.10.2015, до яких вимога значно нижче – 50%; для України, врегулювати можливість вирощування сировини для виробництва рідкого біопалива на забруднених, невикористовуваних, малопродуктивних та деградованих землях [10].

Швидкозростаючий сектор біоенергетики, має великий потенціал, як для транспортного сектору так і економіки в цілому, який за допомогою грамотного підходу буде розвиватись та може стати одним із ключових джерел доходу країни.

Список літератури:

1. Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics (Авт. Вольфрам Левін / Wolfgang Lehmacher, правильно – Wolfgang Kersten та ін.) – базова академічна книга, що охоплює концепції сталого транспортного ланцюга, ефективності, екологічних показників.

2. Scown C.D., Keasling J.D. Sustainable manufacturing with synthetic biology. *Nat Biotechnol* 40, 304–307 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41587-022-01248-8>
3. Scragg A. *Biofuels: Production, Application and Development*. – Oxford : CABI Publishing, 2009. 224 p
4. Benavides P.T., Balchandani S., Gracida-Alvarez U.R. Environmental analysis of biotechnologies for biofuels, bioplastics, and bioproducts: a greenhouse gas (GHG) emissions review. *Biotechnol Environ* 1, 10 2024. URL: <https://doi.org/10.1186/s44314-024-00010-5>
5. IVECO. *IVECO – Tour d'Europe 2025*. – IVECO. URL: <https://www.iveco.com/ukraine/discover-iveco/press-room/Press-Releases/2025/IVECO--Tour-dEurope272025> (дата звернення: 17.08.2025).
6. Ukraine Bioenergy Association. *Interview: "Biomethane can make up Ukraine's gas shortfall"*/ Ukraine Bioenergy Association. – INTELLINEWS. URL: <https://www.intellinews.com/interview-biomethane-can-make-up-ukraine-s-gas-shortfall-ukraine-bioenergy-association-372277/> (дата звернення: 10.08.2025).
7. UABIO. *UABIO news – повідомлення № 17950*. UABIO. URL: <https://uabio.org/news/17950/> (дата звернення: 10.08.2025).
8. European Biogas Association. *European Biomethane Map 2025*. European Biogas Association. URL: <https://www.europeanbiogas.eu/european-biomethane-map-2025/> (дата звернення: 09.08.2025).
9. APK-Inform. *Новина: «...»*. – APK-Inform. URL: <https://www.apk-inform.com/uk/news/1533306> (дата звернення: 17.11.2025).
10. Пастух, А. В. *Основи українського законодавства у сфері біоенергетики* / А. В. Пастух. Київ : UABIO, 2023. 76 с. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/12/2.-Pastuh-A.-V.-Osnovy-ukrayinskogo-zakonodavstva-u-sferi-bioenergetyky.pdf> (дата звернення: 17.08.2025).

Prokudin G.S., Katrushenko N.A., Prokudina I.I., Daniva V.A., Salada A.T. PROSPECTS FOR THE USE OF BIOMETHANE IN FREIGHT TRANSPORT IN UKRAINE

The article considers the analysis of environmental, economic and logistical aspects of the use of biomethane in freight transport in Ukraine. Comparative indicators of greenhouse gas emissions of different fuels, the cost of biomethane production, its advantages and disadvantages in operation, the results of testing biomethane trucks, as well as the problems of transporting raw materials for biogas plants have been studied.

In the field of biomethane, problems related to Ukrainian legislation, which is not ready for new challenges, remain relevant. Ukraine exports a large amount of raw materials for biofuel plants in Europe without using these resources for its own needs. At the same time, it imports fossil fuels, which is why it loses added value, energy independence, and polluting the environment. The lack of a biomethane register, restrictions on the export of natural gas of Ukrainian origin, the lack of a basic law on its production and consumption in transport stop the development of the sector, allowing it to grow and become competitive. Possible ways to overcome this situation are the launch of a biomethane register, the development of a draft Law of Ukraine on its use as a motor fuel, the inclusion of consumption targets in the National Energy Strategy, as well as goals for the number of gas filling stations. In the long term, the introduction of the biomethane market into the Ukrainian economy will significantly increase the potential in the field of international transportation. The integration of environmental standards and the introduction of support for manufacturers can improve the situation of carriers in the European environment. The formation of the domestic market for biomethane consumption will contribute to the creation of new jobs, modernization of infrastructure, and reduction of the dependence of the economy, which is strategically important in the context of European integration processes.

Key words: biomethane, biofuel, logistics, renewable energy, transport sector, greenhouse gas emissions, economic efficiency, green technologies, bioenergy, alternative fuels, energy security.

Дата надходження статті: 24.11.2025

Дата прийняття статті: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Селіванова Н.Ю.

Національний транспортний університет

Шевчук О.С.

Західноукраїнський національний університет

Березька К.М.

Західноукраїнський національний університет

Сіран Р.В.

Західноукраїнський національний університет

АНАЛІЗ УМОВ ВЗАЄМОДІЇ УЧАСНИКІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ

У статті представлено комплексний аналіз умов взаємодії між учасниками перевезення небезпечних вантажів в Україні з урахуванням сучасних викликів у сфері транспортної безпеки, цифровізації логістичних процесів та гармонізації з європейськими регуляторними вимогами. Ідентифіковано ключових учасників логістичного ланцюга, серед яких: перевізники, експедитори, вантажовідправники, аварійно-рятувальні служби, митні органи, уповноважені з питань безпеки, страхові компанії та інформаційно-аналітичні системи, з детальним описом їхньої взаємодії на всіх етапах організації та здійснення перевезень небезпечних вантажів.

Запропоновано концептуальну схему взаємодії, що відображає логіку процесів протягом усього циклу транспортування. Особливу увагу приділено формалізації типів взаємодії: технологічної, правової, інформаційної, операційної, аналітичної, кіберкомунікаційної та взаємодії в надзвичайних ситуаціях. Для ідентифікації ролей, зон відповідальності та міжсуб'єктних зв'язків застосовано методологію RACI-аналізу, що дозволило виявити структурні недоліки та прогалини в чинному нормативному й організаційному середовищі.

На основі отриманих результатів обґрунтовано доцільність створення єдиної національної цифрової ADR-платформи, яка забезпечить гармонізацію взаємодії між державними установами, приватним сектором та міжнародними партнерами, оперативний обмін інформацією, впровадження механізмів попереднього інформування, ризик-орієнтованого планування та прогнозування надзвичайних ситуацій. Дослідження демонструє, що ефективна взаємодія учасників є критичним чинником забезпечення надійності та економічної ефективності перевезень небезпечних вантажів. Запропоновані заходи сприятимуть підвищенню рівня безпеки, зниженню ризиків та підвищенню ефективності перевезень шляхом цифрової трансформації та стандартизації координаційних протоколів.

Ключові слова: небезпечні вантажі, RACI-аналіз, RACI-матриця, ADR-платформа, взаємодія, типи взаємодії суб'єктів перевезення небезпечних вантажів, схема взаємодії.

Постановка проблеми. У сучасних умовах збільшення обсягів перевезення небезпечних вантажів (НВ) зростає потреба не лише у дотриманні міжнародних нормативних вимог (ДОПНВ, IMDG, RID тощо), але й у ефективній взаємодії між усіма учасниками процесу перевезення НВ. Складність полягає в тому, що система перевезення НВ в Україні залишається інформаційно-і функціонально роз'єднаною, що призводить до:

а) затримок логістичних процесів;

б) зростання екологічних ризиків при виникненні аварійних ситуацій;

в) слабка координація між критично важливими структурами – Державна служба надзвичайних ситуацій (ДСНС), митницею, перевізниками, страхувальниками, експедиторами.

Незважаючи на наявність в Україні ратифікованих міжнародних угод та формально створену мережу навчальних центрів, система управління перевезеннями небезпечних вантажів не відпові-

дає вимогам інтегрованого ризик-орієнтованого підходу, який є стандартом у країнах ЄС.

Особливо гостро в країні проблема проявляється у таких аспектах:

1. Відсутність єдиної цифрової ADR-платформи, що унеможливує оперативний обмін інформацією між учасниками та органами контролю.

2. Низька формалізація взаємодії у випадку надзвичайних ситуацій (наприклад, у разі витоків аміаку чи загоряння легкозаймистої речовини).

3. Недостатній рівень інтеграції IT-рішень в наслідок низької поширеності e-CMR, а також систем GPS-моніторингу, аналітики AI для прогнозування ризиків.

4. Відсутність чіткого регламенту RACI-механізмів ускладнює погодження ролей і відповідальності між учасниками процесу перевезення НВ.

5. Мінімальний рівень аналітичної взаємодії, що не дозволяє передбачити системні відмови, проаналізувати тенденції, вивчити профіль аварійності за регіонами або маршрутами.

Таким чином, проблема полягає не лише в технічних або правових аспектах перевезень небезпечних вантажів, а в комплексній недостатності системної взаємодії між усіма учасниками процесу перевезення НВ, особливо в екстрених умовах та в рамках міжнародних перевезень.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження умов та механізмів взаємодії між учасниками перевезення небезпечних вантажів в Україні з урахуванням сучасних викликів у сфері безпеки, цифровізації логістичних процесів та вимог міжнародного регулювання (ДОПНВ, IMDG, RID).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика перевезення небезпечних вантажів залишається однією з найбільш складних та актуальних у сфері транспортної логістики, оскільки безпосередньо пов'язана з ризиками для життя людей, довкілля та інфраструктури [1]. У науковій літературі, нормативних джерелах та міжнародних дослідженнях акцент зміщується від формального дотримання регламентів до інтегрованого підходу, що включає технічні, організаційні, інформаційні та комунікаційні аспекти взаємодії між учасниками перевезення НВ.

У роботі Кравцова В.В. та Олійника О.М. [2] здійснено детальний аналіз ризиків, що виникають під час перевезення небезпечних вантажів, а також обґрунтовано доцільність використання інтегрованих цифрових рішень та засобів прогнозування критичних ситуацій. Однак автори не розглядають аспекти комплексної взаємодії, як

важливу підсистемну задачу підвищення надійності перевізного процесу, до якої не звертається достатньо уваги в країні.

Васильєв О.М. [3] акцентує увагу на інформаційних технологіях у перевезеннях НВ, зокрема впровадженні e-CMR, GPS та платформ цифрового моніторингу, однак задача рольового розподілу відповідальності між суб'єктами (відправник, перевізник, ДСНС, страхувальник тощо) висвітлюється лише побічно.

У міжнародній практиці, зокрема у документах UNECE (ДОПНВ, 2023) [4], чітко формалізовано обов'язки та відповідальність сторін, однак бракує інструментів моделювання взаємодії, які були б адаптовані до національних реалій країн, що розвиваються. Окремі дослідження, опубліковані у журналах *Transport Problems*, *Journal of Hazardous Materials* та *Safety Science*, вказують на необхідність використання RACI-матриць та управлінських блок-схем для зменшення конфліктів на етапах перевезення НВ.

Вітчизняні публікації 2016–2022 років здебільшого зосереджені на класифікації вантажів, технічних характеристиках транспорту або нормативній базі, залишаючи без належної уваги аналітичну, превентивно-аварійну та цифрову взаємодію учасників системи перевезення НВ. У контексті воєнного часу, вітчизняна наукова думка ще не встигла повною мірою адаптувати досвід ЄС та цифрові підходи управління перевезеннями НВ.

Виклад основного матеріалу. У роботі розглядаються актуальні проблеми взаємодії між учасниками процесу перевезення небезпечних вантажів в Україні. В умовах зростання обсягів перевезень небезпечних вантажів автомобільним транспортом в Україні, питання забезпечення безпеки та ефективності транспортних операцій набуває особливої актуальності. Згідно з даними Державної служби статистики України, обсяги перевезень небезпечних вантажів у 2023 році зросли на 15% порівняно з 2022 роком [5]. Незважаючи на це, рівень аварійності та кількість інцидентів, пов'язаних з перевезенням небезпечних вантажів, залишаються високими. Аналіз даних свідчить про те, що однією з основних причин є неефективна взаємодія між учасниками процесу перевезення НВ.

Далі представлено аналіз аварійності перевезень НВ в станах ЄС та США з урахуванням впровадження цифрових платформ. Як, видно, з табл. 1 за останні 10 років спостерігається постійне зростання обсягів перевезень небезпечних вантажів в обох регіонах при одночасному зменшенні кіль-

кості ДТП. 2020–2024 роки – переломні в обох регіонах: помітне зниження аварійності за рахунок: впровадження цифрового документообігу; використання інтерактивних карт ризику; автономного моніторингу транспортних засобів ADR.

У США, попри більшу частку небезпечних вантажів у вантажообігу (в середньому на 0,3–0,5% більше), рівень аварійності значно знизився (менше ніж половина від показників 2015 року).

Відомо, що суб'єктами системи перевезення НВ є:

Вантажовідправник – формує потребу в перевезенні, упакує, маркує вантаж, готує документи (e-ADR/e-CMR).

Вантажоодержувач – приймає вантаж, забезпечує приймання відповідно до вимог безпеки.

Перевізник – здійснює фізичне переміщення вантажу транспортним засобом, несе відповідальність за дотримання правил перевезення.

Експедитор – організовує логістику доставки, забезпечує координацію та документаційний супровід.

Водій ADR – має сертифікат, відповідає за безпечне транспортування, діє в надзвичайних ситуаціях.

Власник транспортного засобу – забезпечує технічну справність і відповідність ДОПНВ.

Уповноважена особа з безпеки (консультант ADR) – здійснює аудит безпеки перевезень у компанії, звітує перед регулятором.

Митні органи – контролюють відповідність вантажу митному режиму та обмеженням щодо небезпечних вантажів.

Прикордонна служба – здійснює прикордонний контроль, перевірку документів.

Органи внутрішніх справ (Національна поліція, патрульна поліція) – супровід, контроль за дотриманням маршрутів, дій у надзвичайних ситуаціях.

ДСНС України – аварійно-рятувальні заходи, реагування на витоки, пожежі, аварії з НВ.

Держекоінспекція – екологічний контроль при транспортуванні шкідливих речовин.

Державна служба України з безпеки на транспорті (Укртрансбезпека) – контроль ліцензій, перевірки.

Органи охорони здоров'я/санепідслужба – у разі транспортування інфекційних або токсичних небезпечних вантажів.

Страхові компанії – страхування ризиків перевезення, відповідальності та вантажу.

Суб'єкти інфраструктури – власники пунктів навантаження, терміналів, складів.

Інформаційні оператори (платформи електронного супроводу) – e-CMR, моніторингові системи, аналітичні сервіси.

Уповноважені органи країн транзиту або призначення – згідно з міжнародними угодами.

Субпідрядники, підрядники та аутсорсингові служби – наприклад, компанії, що здійснюють маркування, дегазацію, техогляд.

Громадські організації та інститути технічного нагляду (BAM, TNO тощо) – в країнах ЄС.

На основі досвіду європейської практики та ДСТУ 4500-1:2008 [10] типи взаємодії між суб'єктами перевезення небезпечних вантажів можна розподілити таким чином:

Таблиця 1

Порівнювальний аналіз аварійності перевезень НВ в станах ЄС та США щодо впровадження цифрових платформ [6, 7, 8, 9]

Рік	Частка НВ у ЄС (%)	ДТП з НВ (ЄС)	Частка НВ у США (%)	ДТП з НВ (США)	Основні тренди
2015	2,98	96	3,51	280	Початок впровадження цифрових платформ ADR
2016	3,05	87	3,72	221	Зростання частки легкозаймистих рідин
2017	3,08	78	3,70	216	Посилення контролю за транспортуванням газів
2018	3,12	91	3,95	198	Активне впровадження електронного документообігу
2019	3,78	82	3,90	174	Підвищення вимог до безпеки транспортування корозійних речовин
2020	3,75	75	4,30	152	Використання інтерактивних карт ризикованих маршрутів
2021	3,91	78	4,10	146	Розширення маршрутної мережі для НВ
2022	4,12	72	4,20	131	Інтеграція нових технологій моніторингу
2023	4,11	65	4,50	132	Зниження аварійності завдяки посиленню регуляторного контролю
2024	4,36	61	4,50	110	Впровадження автономного моніторингу транспорту

1. Технологічна взаємодія. Пов'язана з узгодженням технічних параметрів перевезення:

1.1. Вибір типу транспортного засобу, тари, контейнерів;

1.2. Погодження режиму температури, тиску, інертного середовища;

1.3. Забезпечення відповідності цистерн, пакування та маркування стандартам.

2. Інформаційна взаємодія. Обмін даними в реальному часі:

2.1. Електронний документообіг e-ADR / e-CMR;

2.2. Супутниковий моніторинг (GPS/GNSS);

2.3. Інформування про зміну маршруту, загрози, аварії;

2.4. Використання цифрових платформ (TMS, API, електронні кабінети).

3. Правова взаємодія. Встановлення правових зобов'язань між сторонами:

3.1. Договори перевезення (фрахтування, експедиції, страхування);

3.2. Сертифікація ADR-водіїв, ТЗ, уповноважених осіб;

3.3. Погодження на транзит/експорт/імпорт.

4. Фінансова взаємодія. Включає:

4.1. Розрахунки за перевезення та експедицію;

4.2. Фінансування аварійного реагування;

4.3. Страхування відповідальності, вантажу та ризиків;

4.5. Відшкодування збитків.

5. Операційна взаємодія. Поточна координація дій на етапах:

5.1. Завантаження, перевантаження, вивантаження;

5.2. Погодження часу прибуття;

5.3. Дотримання інструкцій безпеки на терміналах.

6. Превентивно-аварійна взаємодія. Сукупність узгоджених дій і процедур, спрямованих на запобігання виникненню надзвичайних ситуацій під час перевезення НВ:

6.1. Оцінка та моніторинг ризиків;

6.2. Розробка і відпрацювання аварійних планів;

6.3. Матеріально-технічне забезпечення;

6.4. Аналіз результатів тренувань та інцидентів.

7. Аварійно-рятувальна (екстрена) взаємодія. Спільні дії у випадку інциденту:

7.1. Запуск алгоритму сповіщення (ДСНС, поліція, медслужби);

7.2. Аварійні комунікації між водієм, диспетчером і службами;

7.3. Надання плану реагування (Emergency Response Guidebook, Safety Data Sheets).

8. Аналітична взаємодія. Обмін статистичною інформацією, прогнозами та звітами:

8.1. профілі ризику маршруту;

8.2. аналіз ДТП з НВ;

8.3. оцінка ефективності перевізників;

8.4. RACI-матриці, карти ризикованих зон.

9. Кіберкомунікаційна взаємодія. Обмін даними за допомогою цифрових сервісів:

9.1. API між логістичними системами;

9.2. інтеграція e-ADR із державною платформою;

9.3. управління через мобільні застосунки та диспетчерські центри;

9.4. захист від кіберзагроз (автентифікація, резервне копіювання).

10. Контрольно-наглядова взаємодія. Виконується регуляторними органами:

10.1. перевірка дозвільної документації (Укр-трансбезпека, митниця, СЕС);

10.2. контроль на дорогах (поліція);

10.3. аудит безпеки (уповноважені особи з безпеки).

11. Освітньо-консультаційна взаємодія. Пов'язана з:

11.1. Підготовкою ADR-водіїв;

11.2. Навчанням учасників ланцюга перевезення;

11.3. Консультуванням з приводу класифікації та пакування НВ;

11.4. Впровадженням внутрішніх регламентів компанії.

12. Етична/соціальна взаємодія. Стосується відповідальності перед громадою:

12.1. Інформування населення про потенційні загрози;

12.2. Етичне ставлення до безпеки;

12.3. Забезпечення прозорості дій у разі надзвичайних ситуацій.

Типи взаємодії між учасниками перевезення небезпечних вантажів наведено у таблиці 3.

З метою підвищення ефективності взаємодії між учасниками процесу перевезення небезпечних вантажів, у межах даного дослідження було проведено RACI-аналіз, який дозволяє: формалізувати розподіл ролей і відповідальності між суб'єктами перевізного процесу; виявити дублювання або прогалини у функціональній участі окремих учасників; забезпечити чітке визначення відповідального, залученого та поінформованого суб'єкта на кожному з етапів перевезення НВ; створити інструмент планування та координації в умовах реальних логістичних і аварійних ситуацій.

цій; підготувати основу для впровадження цифрових рішень (електронних маршрутів, автоматизованих протоколів, інтегрованих платформ).

Застосування RACI-матриці дало змогу визначити критичні точки взаємодії (наприклад, оформлення транзиту, реагування на надзвичайні ситуації, інформаційний супровід) і сформулювати пропозиції щодо уніфікації та стандартизації ролей учасників з урахуванням сучасних вимог ДОПНВ та кращих практик країн ЄС.

Символ R (Responsible) – Виконавець – особа або організація, яка фізично виконує завдання або безпосередньо відповідає за реалізацію дії (напр., перевізник, що здійснює доставку).

Символ A (Accountable) – Відповідальний – особа, яка приймає остаточне рішення і несе повну відповідальність за результат. Завжди має бути лише одна особа A на завдання (напр., керівник перевезення або замовник)

Символ C (Consulted) – Консультант – особа або орган, якого необхідно залучити до обгово-

рення перед прийняттям рішень або виконанням дії. Відбувається двосторонній зв'язок (напр., орган контролю, страховик).

Символ I (Informed) – Поінформований – особа або структура, яка повинна бути повідомлена про виконання дій або зміну статусу, але не бере участі в прийнятті рішень (напр., митниця, аналітичні служби).

На основі систематизації видів взаємодії розроблено RACI-матрицю суб'єктів системи перевезення небезпечних вантажів (табл. 2).

RACI-матриця дозволила:

1. Чітко формалізувати розподіл ролей і відповідальності між суб'єктами перевізного процесу;
2. Виявити дисфункції у діяльності окремих учасників системи перевезення НВ;
3. Детермінувати статус суб'єктів (відповідальний, залучений, консультований, поінформований) на кожній стадії перевезення НВ;
5. Створити інструмент планування та координації в умовах реальних логістичних і аварійних

Таблиця 2

RACI-матриця суб'єктів системи перевезення небезпечних вантажів

Процес	Вантажовідправник	Вантажоодержувач	Перевізник	Експедитор	Водій ADR	Власник ТЗ	Уповноважена особа з безпеки	Митниця	Прикордонна служба	Поліція	ДСНС	Держекоінспекція	Укртрансбезпека	СЕС / МОЗ	Страхова компанія	Інфраструктурні об'єкти	Інформаційні оператори	Органи інших країн
Підготовка вантажу та документації	R	I	C	C	I	I	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Маршрутизація перевезення	C	I	A	R	R	C	C	I	C	C	I	I	I	I	I	C	C	C
Контроль ADR-допуску ТЗ	I	I	R	C	C	A	C	I	I	I	I	C	I	I	I	I	I	I
Оформлення міжнародного транзиту	C	I	R	C	I	I	I	A	A	C	I	I	I	I	I	I	I	R
Реагування на аварійну ситуацію	I	I	C	I	C	I	C	I	I	A	R	C	C	C	I	I	I	I
Звітність про доставку вантажу	C	R	R	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Страхування перевезення	A	I	C	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	R	I	I	I
Управління безпекою на маршруті	I	I	R	C	C	C	A	I	C	A	C	C	C	I	I	C	C	I
Аналіз ризиків і звітність	I	I	C	C	I	I	R	I	I	I	C	C	C	I	I	A	C	I
Інформаційний супровід	I	I	C	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	R	I

ситуацій; підготувати основу для впровадження цифрових рішень.

Далі представлено таблицю типів взаємодії між учасниками перевезення НВ з урахуванням АDR платформи (табл. 3).

На основі табл. 2 і 3 розроблена принципова схема взаємодії учасників перевезення небезпечних вантажів, яка представлена на рис. 1.

В принциповій схемі взаємодії учасників перевезення небезпечних вантажів враховано 9 важливих видів взаємодії, яку обумовлюють рівень надійності і ефективності перевезень НВ.

В результаті аналізу принципової схеми (рис. 1) виявлені основні недоліки:

1. Відсутність уніфікованих цифрових каналів зв'язку. Інформаційний обмін між учасниками здійснюється переважно за допомогою застарілих методів (телефон, електронна пошта), що призводить до затримок та помилок.

2. Слабка інтеграція між аварійними службами та перевізниками. Відсутність оперативної інформації про вантаж та його стан ускладнює реагування на аварійні ситуації.

3. Недостатня кваліфікація персоналу. Недостатній рівень знань та навичок у сфері переве-

Таблиця 3

Типи взаємодії між учасниками перевезення небезпечних вантажів з урахуванням АDR-платформи

Тип взаємодії	Учасники	Приклад
Технологічна	Вантажовідправник, Перевізник, Власник ТЗ, Уповноважена особа	Погодження типу АDR-цистерни, температурного режиму, маркування, типу тари, вибору ТЗ відповідно до класу безпеки, вимог до ущільнень і клапанів
Інформаційна	Перевізник, Інформаційні оператори, Експедитор, ДСНС, Національна поліція	Моніторинг через е-ADR, GPS-трекінг, е-CMR, е-mail сповіщення, використання QR-кодів, автоматичне оновлення статусу в TMS-системах, обмін аварійними повідомленнями
Правова	Експедитор, Уповноважена особа з безпеки, Перевізник, Страховик	Оформлення договору перевезення, сертифікація АDR, погодження маршруту з місцевими органами, укладання транскордонної угоди, оформлення ліцензії
Фінансова	Вантажовідправник, Перевізник, Страхова компанія, Експедитор	Фінансування доставки, оплата страхування, покриття збитків, погодження тарифів, фінансова компенсація за затримку, розрахунок штрафних санкцій
Операційна	Перевізник, Водій АDR, Термінали, Суб'єкти інфраструктури	Скоординоване завантаження/вивантаження, допуск водія, контроль часу прибуття/відправлення, погодження з диспетчером терміналу, проставлення пломб
Превентивно-аварійна взаємодія	Вантажовідправник, Перевізник, Власник ТЗ, Уповноважена особа, Експедитор, Водій АDR, Інформаційні оператори, ДСНС, медичні служби, Поліція, Страхова компанія, Митні та екологічні органи, Суб'єкти інфраструктури	Проактивна маршрутизація Перевізник і диспетчер TMS вибирають нічний час руху та уникають «гарячих» ділянок за даними телеметрії. Водій АDR і консультант проводять інструктаж з використання аварійного комплексу (герметик, абсорбенти) та відпрацьовують сценарій імітаційної течії. е-ADR встановлює граничні параметри (тиск, температура, інші) та налаштовує автоматичні сповіщення.
Аварійно-рятувальна	ДСНС, Поліція, Водій АDR, МОЗ, Оператори е-сповіщення	Інформування ДСНС про витік, запуск аварійного плану, залучення МОЗ, евакуація персоналу, ізоляція зони витіку, оповіщення громадян через систему «Кібербезпека»
Аналітична	Уповноважена особа, Інформаційні оператори, Укртрансбезпека	Аналіз порушень, формування ризикових профілів маршрутів, RACI-звіти, аналітика аварійності по регіонах, обчислення показника «індексу безпеки»
Кіберкомунікаційна	Перевізник, Платформи е-ADR, API-оператори, TMS-системи	Передача даних через API між TMS, інтеграція е-ADR з державним реєстром, хмарні сервіси доступу до сертифікатів, двофакторна авторизація водія
Контрольно-наглядова	Укртрансбезпека, Митниця, Держекоінспекція, МОЗ	Планові перевірки АDR-документації, техогляду ТЗ, контроль маркування, аудит вантажовідправника, перевірка сертифікатів персоналу, обстеження маршруту
Освітньо-консультаційна	Навчальні центри, Уповноважена особа, ДСНС, МОЗ	Підвищення кваліфікації, навчання дій в НС, сертифікація персоналу, інструктаж з пожежної безпеки, імітація аварій на тренажерах, онлайн-курси АDR
Етична/соціальна	ДСНС, Громадські організації, ОМС – Органи місцевого самоврядування, Населення	Оповіщення населення при транзиті вибухових речовин через міста, розміщення інформації на сайтах громад, громадські слухання щодо небезпечних маршрутів

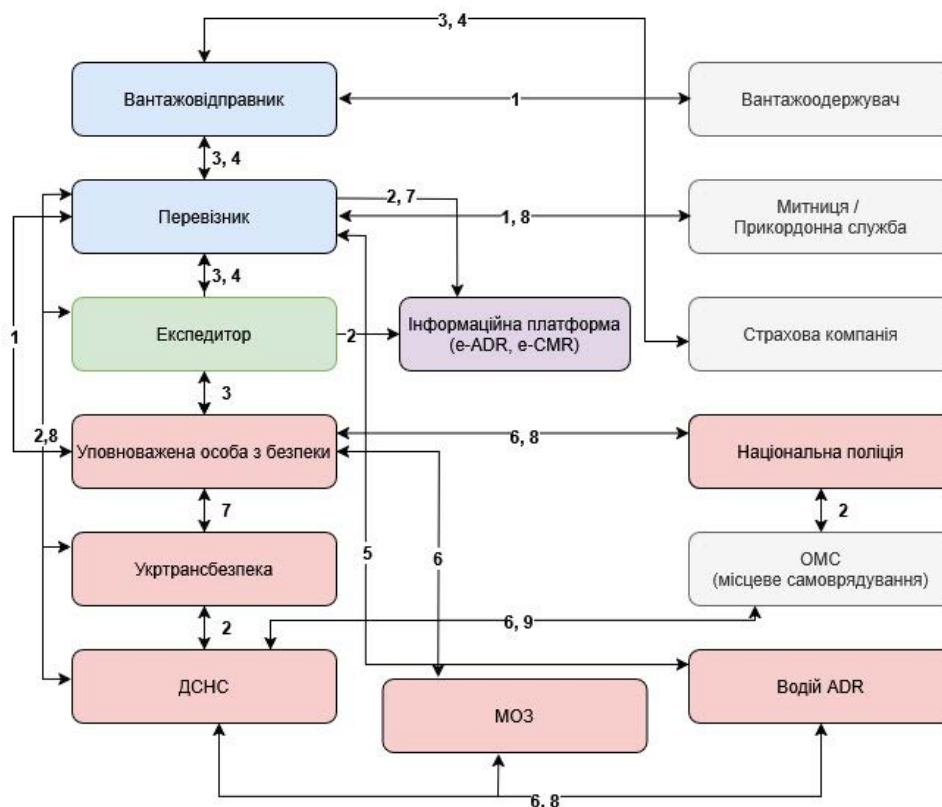


Рис. 1. Принципова схема взаємодії учасників перевезення небезпечних вантажів:
 1 – Технологічна взаємодія; 2 – Інформаційна взаємодія; 3 – Правова взаємодія;
 4 – Фінансова взаємодія; 5 – Операційна взаємодія; 6 – Аварійно-рятувальна взаємодія;
 7 – Аналітична взаємодія; 8 – Контрольна/наглядова взаємодія; 9 – Етична/соціальна взаємодія

ження небезпечних вантажів у персоналу призводить до порушень вимог безпеки.

4. Відсутність інституційно закріпленої відповідальності. Нечіткий розподіл відповідальності між учасниками процесу перевезення НВ ускладнює притягнення винних до відповідальності у разі порушення зобов'язань.

На основі проведеного аналізу, запропоновано наступні заходи щодо вдосконалення взаємодії між учасниками перевезення небезпечних вантажів:

1. Створення єдиної національної платформи ADR-операцій. Платформа повинна забезпечувати обмін інформацією між усіма учасниками процесу перевезення в режимі реального часу.

2. Розробка системи рейтингової відповідальності перевізників. Рейтинг повинен враховувати кількість порушень вимог безпеки, наявність аварій та інцидентів, а також рівень кваліфікації персоналу.

3. Впровадження інтерактивної карти ризикованих маршрутів. Карта повинна відображати інформацію про стан доріг, наявність аварійних ділянок, а також метеорологічні умови.

4. Стандартизація договорів експедирування для небезпечних вантажів: Договори повинні чітко визначати права та обов'язки кожної сто-

рони, а також відповідальність за порушення зобов'язань.

Висновки. У ході дослідження встановлено, що чинні теоретичні та практичні підходи до управління системою перевезень небезпечних вантажів (НВ) не повною мірою відповідають сучасним вимогам безпеки та ефективності. Взаємодія між учасниками перевезень визначена як ключовий чинник, що суттєво впливає на надійність логістичних операцій.

Застосування RACI-аналізу дозволило чітко окреслити ролі та зони відповідальності учасників, а також виявити критичні точки взаємодії й прогалини в нормативному регулюванні. Побудована принципова схема взаємодії забезпечила виявлення основних недоліків організації перевезень і стала основою для формування пропозицій щодо їх усунення.

Рекомендовані заходи – цифровізація процесів, створення ADR-платформи, впровадження механізмів попереднього інформування та карт ризику – спрямовані на підвищення рівня безпеки та ефективності перевезень.

Подальші дослідження доцільно зосередити на цифровому моделюванні сценаріїв взаємодії та розробці єдиних стандартів координації дій між усіма учасниками перевезень.

Список літератури:

1. European Agency for Safety and Health at Work. Transport of Dangerous Goods: Risk Assessment and Prevention. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. 60 p.
2. Кравцов В. В., Олійник О. М. Управління ризиками під час перевезень небезпечних вантажів. Харків : ХНАДУ, 2020. 148 с.
3. Васильєв О. М. Інформаційні технології в транспортній логістиці. Київ : НАУ, 2017. 208 с.
4. Європейська економічна комісія ООН. Угода ЄКМТ ДОПНВ (ADR): Станом на 1 січня 2023 року. Женева : UNECE, 2023. 1328 с.
5. Державна служба статистики України. Транспорт і зв'язок України 2023: Статистичний збірник. Київ : Держстат України, 2024. 368 с.
6. Eurostat. Transport of Dangerous Goods in the EU: Statistical Report. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2020. 45 p.
7. European Transport Safety Council. EU Transport Accident, Incident and Casualty Database. Brussels : ETSC, 2023. 45 p.
8. Statista. U.S. Freight Transportation Market Analysis. New York: Statista Inc., 2021. 15 p. URL: <https://www.statista.com>.
9. U.S. Department of Transportation. Hazardous Materials Incident Reports. Washington: Federal Motor Carrier Safety Administration, 2023. 120 p. URL: <https://www.fmcsa.dot.gov>.
10. ДСТУ 4500-1:2008. Вантажі небезпечні. Терміни та визначення понять. [Чинний від 2009-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 47 с.

Selivanova N.Yu., Shevchuk O.S., Berezka K.M., Siran R.V. ANALYSIS OF INTERACTION CONDITIONS AMONG STAKEHOLDERS IN DANGEROUS GOODS TRANSPORTATION

The article presents a comprehensive analysis of interaction conditions among stakeholders involved in the transportation of dangerous goods in Ukraine, addressing contemporary challenges in transport safety, logistics digitalization, and alignment with European regulatory frameworks. Key stakeholders of the logistics chain are identified, including carriers, freight forwarders, consignors, emergency response services, customs authorities, safety advisers, insurance companies, and information-analytical systems, with detailed description of their interaction throughout the organization and execution of dangerous goods transportation.

A conceptual interaction scheme is proposed, reflecting process logic across all transportation stages. Particular attention is devoted to formalizing interaction types: technological, legal, informational, operational, analytical, cyber-communication, and emergency response interaction. RACI analysis methodology is employed to identify roles, responsibility zones, and interrelationships among transportation stakeholders, revealing structural deficiencies and gaps in existing regulatory and organizational frameworks.

Based on obtained results, the necessity of establishing a unified national digital ADR platform is substantiated, enabling harmonization of interaction between government agencies, private companies, and international partners, ensuring operational information exchange, implementing pre-notification mechanisms, risk-oriented planning, and emergency forecasting. The study demonstrates that effective stakeholder interaction constitutes a critical factor in ensuring reliability and economic efficiency of dangerous goods transportation. Proposed measures enable enhancement of safety levels, risk reduction, and improvement of transportation efficiency through digital transformation and standardization of coordination protocols.

Key words: dangerous goods, RACI analysis, RACI matrix, ADR platform, interaction, types of interaction, subjects of dangerous goods transportation, interaction scheme.

Дата надходження статті: 12.11.2025

Дата прийняття статті: 02.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Селіванова Н.Ю.

Національний транспортний університет

УПРАВЛІННЯ ІНЦИДЕНТАМИ Й НАДЗВИЧАЙНИМИ СИТУАЦІЯМИ ПРИ АВТОПЕРЕВЕЗЕННЯХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ: РОЛЬ ЕКСПЕДИТОРА ЯК КООРДИНАЦІЙНОЇ ЛАНКИ

Стаття присвячена проблемі, яка залишається недостатньо висвітленою як у вітчизняних, так і в європейських публікаціях з безпеки перевезень небезпечних вантажів (НВ), – участі транспортного експедитора в управлінні інцидентами та надзвичайними ситуаціями, що виникають під час автомобільних перевезень. На відміну від водія або перевізника, обов'язки яких чітко визначені положеннями ADR і Директиви 2008/68/EC, роль експедитора у системі реагування залишається неформалізованою, що створює прогалину між реальними управлінськими функціями та нормативним забезпеченням. На основі аналізу міжнародних нормативних документів (ADR, UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Directive 2008/68/EC), національних актів України й відкритих статистичних даних МВС і ДСНС за 2023–2024 рр. встановлено, що частка ДТП безпосередньо з НВ у загальній структурі аварійності становить менше 0,1 %, проте наслідки таких подій є надзвичайно масштабними для населення, довкілля та інфраструктури [1, с. 45–49; 2, с. 102–107; 8, с. 51–55]. Це свідчить, що в системі безпеки транспортування НВ вирішальне значення мають не лише технічні чинники, а й оперативність і якість управлінських рішень, де експедитор є ключовою комунікаційною ланкою між перевізником, вантажовласником і службами реагування.

У результаті критичного аналізу праць провідних дослідників (А. Majlingová, N. Batarlienė, J. Flodén, M. Repčelj, S. Bęczkowska та ін.) виявлено, що вони концентрують увагу на ризик-менеджменті, нормативній гармонізації та інфраструктурних обмеженнях, але не розглядають людський і організаційний вимір діяльності експедитора в момент інциденту [4, с. 65–66; 5, с. 72–74; 6, с. 41–44; 10, с. 12–13; 13, с. 114–116; 14, с. 60–62; 15, с. 87–88]. Така прогалина зумовлює потребу в розробленні науково обґрунтованої моделі взаємодії експедитора з учасниками перевізного процесу у ситуаціях ризику. У статті запропоновано п'ятиетапну модель «попередження – виявлення – повідомлення – реагування – відновлення», де експедитор визначений як інформаційний та координаційний центр управління інцидентом. Представлено структуровану форму оперативної картки події та RACI-таблицю розподілу функцій між перевізником, експедитором, вантажовласником і службами цивільного захисту. Доведено, що інституціоналізація ролі експедитора в ланцюгу сповіщення та реагування дозволяє скоротити час ідентифікації вантажу, зменшити комунікаційні втрати, підвищити узгодженість дій учасників і забезпечити безпечніше проведення аварійно-рятувальних робіт. Результати дослідження мають практичну цінність для оновлення національних планів реагування на НС, розроблення стандартів взаємодії в транспортній галузі та включення тематики «Управління інцидентами з НВ» до освітніх програм підготовки експедиторів і логістів.

Ключові слова: небезпечні вантажі, автомобільні перевезення, інцидент, надзвичайна ситуація, експедитор, ADR, управління інцидентами, людський фактор.

Постановка проблеми. Перевезення небезпечних вантажів (НВ) автомобільним транспортом є одним із найбільш регламентованих видів транспортної діяльності у світі: вимоги ООН, ЄЕК ООН (ADR), а також правові акти Європейського Союзу (зокрема, Директива 2008/68/EC) детально визначають класифікацію НВ, вимоги до пакування, маркування, допуску транспортних засобів і підготовки водіїв [1, с. 45–49; 2, с. 102–107;

3, с. 5–23]. Разом з тим, у цих документах практично відсутня деталізація професійних вимог до транспортного експедитора як суб'єкта, який фактично ініціює й координує організацію перевезення, формує пакет перевізних документів (у т.ч. e-CMR), погоджує маршрут, взаємодіє з перевізником і вантажовласником, а у випадку інциденту має передати повну й достовірну інформацію службам реагування. Інакше кажучи, міжнародна

нормативна база концентрується на «що» і «як» перевозити, але майже не описує «хто» і «якими компетентностями» має це забезпечувати на рівні експедиторської діяльності.

Ситуація ускладнюється тим, що в Україні, попри активну імплементацію норм ADR та адаптацію законодавства до вимог ЄС, не сформовано єдиної національної рамки компетентностей для експедиторів, що працюють з НВ. Підготовка таких фахівців здійснюється фрагментарно: частина знань надається у межах освітніх програм зі спеціальності 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» та J8 «Автомобільний транспорт», частина – у вигляді короткострокових курсів чи тренінгів, орієнтованих переважно на водіїв НВ, а не на експедиторів. У результаті формується розрив між реальними повноваженнями експедитора (він часто є єдиним, хто володіє повною інформацією про вантаж, маршрут, контрагентів, страхове покриття) та нормативно закріпленими вимогами до його підготовки.

У країнах ЄС проблему частково пом'якшує функція «радника з безпеки перевезень небезпечних вантажів» (DGSA), передбачена ADR, проте цей інститут більше спрямований на контроль і аудит безпеки в компанії, ніж на щоденну експедиторську роботу. Більше того, ані ADR, ані Директива 2008/68/EC не вимагають, щоб кожен експедитор, який фактично організовує відправлення НВ, мав підтверджену кваліфікацію чи проходив регулярне підвищення кваліфікації (БПР), – у той час як саме експедитор може допустити критичні для безпеки помилки у виборі перевізника, визначенні маршруту чи перевірці документів [3, с. 17–18; 7, с. 33–35].

Аналіз наукових праць з безпеки перевезень НВ показує, що провідні дослідники (А. Majlingová, N. Batarlienè, S. Bęczkowska, J. Flodén, M. Renčelj) концентрують увагу на ідентифікації ризиків, надійності транспортної інфраструктури, удосконаленні інформаційних систем і моніторингу, але майже не розглядають експедитора як окремих об'єкт стандартизації компетентностей [4, с. 65–66; 5, с. 72–74; 6, с. 41–44; 10, с. 12–13; 12, с. 25–40]. Унаслідок цього питання «яким має бути експедитор, що працює з НВ», лишається поза основним науковим дискурсом, а компетентнісні вимоги до нього формуються переважно практикою компаній або внутрішніми регламентами асоціацій, що не гарантує ані єдності підходів, ані відповідності європейським стандартам.

Додатковим викликом є динамічність нормативного середовища. ADR оновлюється кожні два

роки; з'являються нові електронні форми документів (e-CMR, e-DG Note, напращування UN/CEFACT); Україна послідовно наближає своє транспортне законодавство до норм ЄС. За таких умов початкової підготовки експедитора, очевидно, недостатньо – потрібен механізм систематичного оновлення знань і навичок, тобто впровадження безперервного професійного розвитку (БПР) як обов'язкового елемента професійної діяльності експедитора. Відсутність же формалізованої БПР-системи для експедиторів, що працюють з НВ, призводить до швидкого морального старіння компетенцій, нерівномірності якості послуг і, як наслідок, – до потенційного зниження рівня безпеки перевезень.

Отже, сутність проблеми полягає в тому, що існуюча нормативна база у сфері перевезень НВ задає високі вимоги до процесу перевезення, але не визначає змісту, структури й механізмів підтримання компетентності саме експедиторів; наукові публікації лише побіжно торкаються цієї категорії фахівців; а освітні стандарти ЗВО та галузеві сертифікаційні практики в Україні поки що не забезпечують належного рівня уніфікації. Це зумовлює потребу у розробленні й впровадженні цілісної системи компетентностей для експедиторів, що працюють з небезпечними вантажами, – з чітко описаними знаннями, уміннями, відповідальністю та обов'язковим компонентом БПР [1, с. 47–48; 3, с. 19–20; 7, с. 34–35; 9, с. 28–30].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових праць показав, що провідні європейські та українські дослідники зосереджуються переважно на технічних, інфраструктурних та правових аспектах безпеки перевезень небезпечних вантажів. Так, А. Majlingová [4, р. 65–66] і N. Batarlienè [5, р. 72–74] розкривають методи оцінки ризику та роль людського фактора, J. Flodén [6, р. 41–44] описує структуру мережі учасників транспортного процесу, а M. Renčelj [10, р. 12–13] аналізує інституційні бар'єри в системах управління безпекою.

В українських дослідженнях Ковальова В. І. та Коцюка О. П. [13, с. 114–116] увагу зосереджено на правовому механізмі реагування при ДТП з НВ, проте функція експедитора як координатора залишається описаною фрагментарно. Савченко О. В. [14, с. 60–62] наголошує на потребі компетентнісного підходу до підготовки логістичних кадрів, однак питання дій експедитора у кризових умовах не деталізовано. Сидоренко С. М. і Петренко Д. В. [15, с. 87–88] акцентують на необхідності інтеграції експедитора у схему сповіщення служб реагу-

вання, що узгоджується з висновками цього дослідження.

Таким чином, і європейські, і вітчизняні наукові джерела підтверджують існування інституційної прогалини щодо нормативного визначення ролі експедитора у системі управління інцидентами з НВ. Провідні дослідники з безпеки перевезень НВ зосереджуються на ризику, нормативній базі, техніці й інфраструктурі, але не розглядають експедитора як обов'язкову координаційну ланку при інциденті. Саме тому запропонована модель має наукову новизну.

Постановка завдання. Метою статті є обґрунтування, що у випадку інциденту або НС при автомобільних перевезеннях НВ експедитор повинен виступати координатором інформаційних потоків між перевізником, вантажовласником та органами реагування, і що це має бути закріплено у нормативних/договірних документах.

Виклад основного матеріалу. Управління інцидентами при перевезенні небезпечних вантажів вимагає інтегрованого підходу, у якому поєднуються технічні, організаційні та комунікаційні компоненти. Відповідно до аналізу звітів МВС та ДСНС України за 2023–2024 роки, кількість дорожньо-транспортних пригод з небезпечними вантажами є незначною, проте наслідки таких подій залишаються надзвичайно серйозними [8, с. 51–55; 11, с. 89–94]. Це зумовлює необхідність удосконалення системи реагування, у якій експедитор виконує не допоміжну, а координаційну функцію, забезпечуючи оперативний обмін достовірною інформацією між перевізником, вантажовласником, аварійно-рятувальними службами та органами влади.

На відміну від водія чи перевізника, які діють у межах конкретної транспортної операції, експедитор має системне бачення логістичного ланцюга та володіє інформацією, необхідною для прийняття рішень у перші хвилини після інциденту. Він є зв'язковою ланкою між «гарячою зоною» події та «холодною зоною» управління, забезпечуючи безперервність інформаційного потоку, що особливо важливо при обмеженому

доступі до офіційних даних про характер небезпечного вантажу.

Для підвищення ефективності реагування в роботі запропоновано п'ятиетапну модель «попередження – виявлення – повідомлення – реагування – відновлення», у межах якої експедитор виступає головним координатором інформаційних потоків. Така модель забезпечує зменшення часу на ідентифікацію вантажу, скорочення комунікаційних втрат та підвищення узгодженості дій між усіма учасниками транспортного процесу.

а) Статистична характеристика інцидентів. У 2023 р. в Україні було зареєстровано 23 642 ДТП з потерпілими; у 2024 р. кількість таких ДТП зросла до орієнтовно 25–26 тис. [8, с. 51–55; 9, с. 26–30]. При цьому в офіційних звітах МВС не виділяється окремо категорія «ДТП з НВ», але у звіті ДСНС про техногенні НС зафіксовано 1–3 події на рік, пов'язані з перевезенням небезпечних речовин (як правило – нафтопродукти, зріджений газ, хімічні реагенти) [11, с. 89–94]. Така дуже мала вибірка створює ілюзію, що проблема «не актуальна». Проте з погляду цивільного захисту навіть одна аварія з вибухо- або пожежо-небезпечним вантажем на ділянці з щільною забудовою або поблизу водозабору є подією, що вимагає негайної координації. Саме тому у статтях із безпеки НВ часто наголошується на якісному, а не кількісному підході до оцінювання таких ризиків [4, с. 65–66; 5, с. 72–74].

б) Нормативно-організаційні вимоги

ADR (розділи 5.4, 8.1) встановлює, що водій, який перевозить НВ, має мати при собі документи із зазначенням небезпечної речовини (UN-номер, офіційна назва перевезення, клас, група пакування), аварійні інструкції та засоби первинного реагування [1, с. 45–49]. Directive 2008/68/EC поширює вимоги ADR на внутрішні перевезення в ЄС, вимагаючи від держав-членів забезпечити належну підготовку персоналу [3, с. 12–15]. Українські плани реагування на НС (державного та регіонального рівнів) вимагають негайного інформування ДСНС, поліції, медичних служб та органів місцевого самоврядування у разі аварії, пов'язаної

Таблиця 1

Співвідношення загальної аварійності та подій з НВ в Україні

Показник	2023 р.	2024 р. (оцінка)	Джерело
ДТП з потерпілими, од.	23 642	25 000–26 000	МВС України [8, с. 51–55; 9, с. 26–30]
Загиблих, осіб	3 053	≈3 200	МВС України [8, с. 51–55; 9, с. 26–30]
Техногенні НС на автотранспорті, од.	поодинокі	поодинокі	ДСНС України [11, с. 89–94]
З них пов'язані з перевезенням НВ	1–3	1–3	узагальнення автора на підставі [11, с. 89–94]

з викидом небезпечних речовин [11, с. 89–91]. Але в жодному з цих документів експедитор не названий серед адресатів повідомлення.

Це і є головна організаційна суперечність: суб'єкт, який має усю логістичну інформацію, не включений до офіційної схеми реагування. Власне, на це вказують і автори досліджень з людського виміру безпеки перевезень НВ, які підкреслюють важливість коректних комунікаційних каналів у перші хвилини події [12, с. 28–30].

в) Людський / організаційний аспект ролі експедитора

На відміну від водія, який у момент ДТП діє в умовах стресу, і на відміну від диспетчера перевізника, чия увага сфокусована на транспортних ресурсах, експедитор перебуває в «метапозиції»:

- він не на місці події, отже здатен мислити не в стресовому режимі;
- він бачить увесь ланцюг постачання – знає, що це відправлення може бути частиною серії відправок цього ж НВ і що треба зупинити наступні;
- він має комунікаційні ресурси (телефон, e-mail, месенджери, внутрішню систему ТЕО) і може паралельно сповістити кілька сторін;
- він має цифрові копії документів (e-CMR, інвойс, специфікація, паспорт безпеки), навіть якщо паперові оригінали знищені або ушкоджені.

З точки зору організаційної теорії це означає, що експедитор виконує роль посередника-стабілізатора між «гарячою» зоною (місце аварії) і «холодною» зоною (штаб реагування, вантажовласник). У літературі з ризик-менеджменту НВ наголошується, що більшість фатальних рішень ухвалюється або на неповній інформації, або на застарілій інформації [4, с. 66–68; 12, с. 29–31]. Залучення експедитора зменшує обидві ці проблеми, бо саме він може швидко підтвердити: «Це був UN 1203, 12 000 л, група пакування II, маршрут – М-06, одержувач – ...».

Водночас в навчальних посібниках для експедиторів (FIATA Model Rules; університетські курси з транспортно-експедиторського обслуговування) функція реагування на інциденти зазвичай формулюється розпливчасто: «експедитор сприяє вирішенню проблем, що виникають під час перевезення» [7, с. 33–35]. Для НВ це недостатньо; потрібна конкретика – хто кому телефонує, у якій послідовності, яку інформацію передає, у якому форматі.

г) Автором пропонується п'ятиетапна модель, що складається з наступних етапів:

1. Попередження. Експедитор до відправлення перевіряє: допуски ТЗ і водія; коректність маркування; наявність аварійних інструкцій; канал для миттєвого інформування. У договорі ТЕО закріплюється: «у разі інциденту водій одночасно повідомляє 101/102 та експедитора» [1, с. 45–49; 7, с. 34–35].

2. Виявлення. Після події водій/перевізник відправляє коротке повідомлення експедитору: місце, час, тип НВ (зі слів), вид ушкодження (витік, пожежа).

3. Повідомлення. Експедитор, маючи повний пакет документів, формує оперативну картку інциденту і передає її в ДСНС/поліцію/вантажовласнику.

4. Реагування. Органи реагування отримують уже ідентифіковану небезпечну речовину, що скорочує час підбору засобів локалізації.

5. Відновлення. Експедитор консолідує документи, звіти, фото, коригує інструкції, сповіщає про зупинку інших відправок цього НВ.

У разі виникнення аварійної ситуації з небезпечним вантажем на маршруті перевезення в системі логістичних зв'язків одночасно задіяні кілька суб'єктів, які мають різний рівень доступу до інформації та різний ступінь відповідальності. Для коректного розподілу функцій у моделі

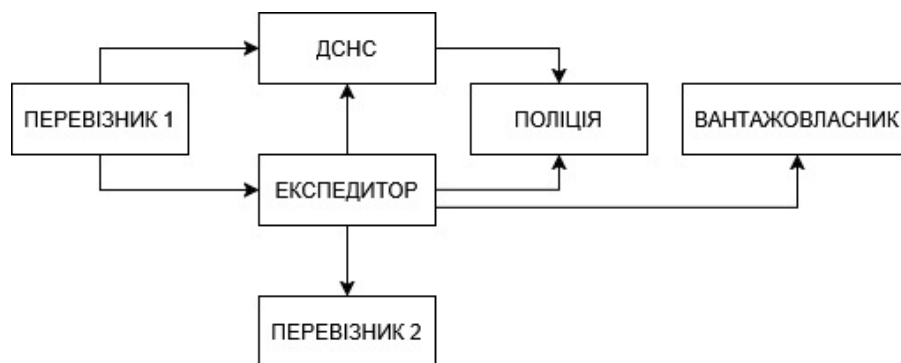


Рис. 1. Схема інформаційних зв'язків при інциденті з НВ

(джерело: розробка автора на основі [1–3; 7])

управління інцидентом умовно виділяють перевізника-1 та перевізника-2 (та інших).

Перевізник-1 – це транспортна компанія або індивідуальний перевізник, транспортний засіб якої безпосередньо потрапив у дорожньо-транспортну пригоду або став учасником інциденту з небезпечним вантажем. Саме він є першоджерелом інформації про подію. Водій перевізника-1, відповідно до вимог ADR (розділ 1.4 та 8.1.5), зобов'язаний повідомити про аварію компетентні органи (службу 101, поліцію) і власне експедитора. У реальних умовах саме від експедитора залежить, наскільки швидко отримана інформація буде структурована, уточнена та передана далі у відповідні канали реагування.

Перевізник-2 (та інші) – це інші транспортні компанії або водії, які у цей самий період часу виконують рейси з тим самим типом небезпечного вантажу (ідентичний *UN-номер*, постачальник, маршрут, партія або контракт). Ці рейси можуть бути частиною єдиної відправки чи логістичного ланцюга, організованого тим самим експедитором. Вони не є безпосередніми учасниками події, проте потенційно знаходяться в зоні вторинного ризику, оскільки:

- використовують ідентичну упаковку чи цистерни, які можуть мати той самий виробничий дефект, що спричинив інцидент;
- рухаються тим самим маршрутом, який може бути тимчасово перекритий поліцією чи ДСНС;
- перебувають у транспортному коридорі з підвищеною небезпекою, якщо відбулася пожежа, витік або забруднення повітря;
- можуть стати об'єктом ланцюгового ризику – наприклад, вибуху, займання парів чи вторинного витоку.

Після отримання підтвердження про інцидент від перевізника-1 або водія експедитор, крім обов'язкового інформування державних служб (ДСНС, поліція, місцева влада), має виконати додаткову превентивну дію – поінформувати перевізників-2 (та інших залучених операторів) про ризики та можливі обмеження. Така дія відповідає логіці превентивного управління ризиками (Preventive Risk Communication), яка визнана практикою ЄЕК ООН у сфері транспортної безпеки [1, с. 47–48; 2, с. 105–107].

Основні завдання експедитора у цей момент:

1. Передати повідомлення про потенційне блокування маршруту (закриття ділянки дороги, об'їзди, затримка руху).
2. Рекомендовано змінити маршрут або призупинити рух до отримання офіційного дозволу від поліції чи ДСНС.

3. За наявності підозри на дефект тари або обладнання, повідомити всіх перевізників, що використовують аналогічну тару, про необхідність її додаткового огляду.

4. Звернути увагу на можливість ланцюгового ризику – розповсюдження хімічної речовини, вибухових парів, займання чи паніки серед населення.

5. Забезпечити зворотній зв'язок – отримати підтвердження від перевізників-2, що вони отримали повідомлення та виконали рекомендації.

Таким чином, стрілка «Експедитор → Перевізник-2» у схемі інформаційних зв'язків (рис. 1) символізує превентивний комунікаційний потік, спрямований не на ліквідацію наслідків конкретного інциденту, а на попередження можливих вторинних подій у межах тієї ж мережі. Це підкреслює управлінську та стратегічну роль експедитора, який одночасно виконує функції аналітика ризиків, координатора безпеки та комунікаційного посередника.

Оперативна картка інциденту у цій моделі виступає як центральний інструмент обміну інформацією. Це стандартизований документ, який експедитор формує одразу після отримання первинного повідомлення про ДТП або витік НВ. Картка містить уніфіковані відомості: UN-номер, назву речовини, клас небезпеки, кількість, маршрут, дані перевізника, точні координати події, короткий опис характеру інциденту та контактну інформацію експедитора.

Передача оперативної картки до ДСНС, поліції та вантажовласника дозволяє забезпечити швидку ідентифікацію небезпечної речовини, правильний вибір засобів нейтралізації, скорочення часу реагування та зниження людського фактора у процесі прийняття рішень. У більшості європейських країн аналогічні картки використовуються в електронній формі (e-DG Incident Form), що інтегрується із системами моніторингу ADR-transport. Для України впровадження такої форми є логічним етапом цифровізації управління ризиками у сфері НВ.

е) Розподіл функцій (людський аспект) відображає взаємодію учасників перевізного процесу не лише з позиції формальних обов'язків, а й з урахуванням психологічних, комунікаційних та управлінських особливостей поведінки людей під час інциденту, коли від узгодженості їхніх дій, швидкості реагування та взаємної довіри залежить ефективність ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

Таблиця 2

Фрагмент оперативної інформаційної картки експедитора при інциденті з НВ*

Поле	Зміст	Коментар
Дата, час	31.10.2025, 11:42	фактичний час події
Місце	М-06 Київ–Чоп, км 142+300	координати GPS додаються
Перевізник	ТОВ «...», ліцензія ...	перевірено експедитором
Експедитор (24/7)	ПІБ, тел., e-mail	обов'язкове поле
Вантаж (UN №)	UN 1203 БЕНЗИН, клас 3, гр. пак. II	зі специфікації
Кількість	12 000 л	фактична
Характер події	з'їзд у кювет, пошкодження цистерни, витік	опис зі слів водія
Рекомендації ADR	інструкції у письмовій формі додаються	розділ 8.1.5 ADR [1]
Додаткові ризики	поблизу водозабір; ЛЕП	з карти маршруту

*Ця форма відрізняється від стандартних повідомлень тим, що заповнюється не рятувальником, а експедитором, який знає вантаж.

Таблиця 3

Розподіл відповідальності між учасниками реагування (RACI-модель)

Функція / дія	Водій/ перевізник	Експедитор	ДСНС / 101	Вантажо- власник
Первинне повідомлення про ДТП	R	I	I	I
Уточнення даних про НВ	I	R	C	C
Передача документів у цифровій формі	I	R	C	I
Виклик аварійно-рятувальних служб	R	C	A	I
Інформування про інші відправки цього НВ	–	R	I	A
Підготовка звіту про інцидент	C	R	C	A

(R – відповідає; A – затверджує; C – консультує; I – інформується)

Тут і проявляється організаційний аспект: експедитор у більшості дій позначений як R (відповідає) не тому, що він «винуватий», а тому, що у нього є найповніша інформація і він операційно здатний її передати.

Висновки. У даному дослідженні розглянуто роль експедитора як координаційної ланки в управлінні інцидентами та надзвичайними ситуаціями під час автомобільних перевезень небезпечних вантажів. На основі аналізу нормативно-правової бази, статистичних даних та наукових публікацій було обґрунтовано алгоритм дій, який дозволяє удосконалити систему реагування на інциденти, підвищити оперативність обміну інформацією та мінімізувати наслідки аварій. Отримані результати свідчать, що впровадження чіткої моделі взаємодії учасників транспортного процесу, у якій експедитор виконує функцію інформаційно-комунікаційного центру, здатне суттєво підвищити рівень безпеки перевезень НВ.

1. Українська статистика ДТП за 2023–2024 рр. демонструє зростання загальної аварійності на автошляхах (23,6 тис. ДТП з потерпілими у 2023 р. → близько 25–26 тис. у 2024 р.), тоді як кількість інцидентів саме з перевезенням НВ залишається одиничною, проте кожен такий випадок має підвищену небезпеку для людей і довкілля [8, с. 51–55; 9, с. 26–30; 11, с. 89–94].

2. Міжнародні документи (ADR, UN Model Regulations, Directive 2008/68/EC) детально регламентують технічні та організаційні вимоги до водія і перевізника, однак не визначають експедитора як суб'єкта оперативного реагування, що створює нормативну прогалину [1, с. 45–49; 2, с. 102–107; 3, с. 12–15].

3. Аналіз наукових праць показав, що провідні дослідники (A. Majlingová, N. Batarlienè, J. Flodén, M. Renčelj) приділяють увагу ризик-менеджменту, інфраструктурним аспектам і цифровізації, але майже не розглядають експедитора як координаційну ланку під час інцидентів із НВ, що визнає наукову новизну статті [4, с. 65–68; 5, с. 72–74; 6, с. 41–44; 10, с. 12–13; 12, с. 28–30].

4. Запропонована п'ятиетапна модель «попередження – виявлення – повідомлення – реагування – відновлення», у межах якої експедитор виступає центральним інформаційним вузлом, дозволяє скоротити час ідентифікації вантажу, зменшити комунікаційні втрати та підвищити ефективність рішень ДСНС і правоохоронних органів.

5. Для практичного впровадження моделі доцільно:

– внести до типових планів реагування на НС положення про обов'язкове інформування експедитора у разі ДТП з НВ;

– передбачити в договорах транспортно-експедиторського обслуговування вимогу цілодобового (24/7) контактного каналу експедитора;

– доповнити освітні програми ЗВО модулем «Роль експедитора в управлінні інцидентами при перевезенні НВ».

6. Обмеження дослідження полягає в обмежній відкритості статистики щодо ДТП із НВ; перспективи подальших робіт – проведення емпірич-

них опитувань експедиторів і служб реагування для кількісної оцінки ефективності моделі та часу реагування при залученні експедитора.

Таким чином, запропонований підхід формує теоретичне та практичне підґрунтя для розроблення національних рекомендацій і освітніх стандартів у сфері транспортно-експедиторського обслуговування перевезень небезпечних вантажів.

Список літератури:

1. United Nations. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Model Regulations. New York; Geneva: UN, 2023. 580 p. P. 45–49.
2. UNECE. European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR). Geneva : UNECE, 2025 ed. 1504 p. P. 102–107.
3. Directive 2008/68/EC of the European Parliament and of the Council of 24 September 2008 on the inland transport of dangerous goods. *Official Journal of the European Union*. 2008. L 258. P. 5–23.
4. Majlingová A. Management of Risks Associated with Dangerous Goods Transportation – Review. *Safety Science*. 2019. Vol. 118. P. 64–71.
5. Batarlienè N. Essential Safety Factors for the Transport of Dangerous Goods. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, Iss. 5. P. 72–79.
6. Flodén J. A stakeholder analysis of actors and networks for land transport of dangerous goods. *Journal of Transport Geography*. 2021. Vol. 90. P. 41–48.
7. FIATA. Model Rules for Freight Forwarding Services. Zürich: FIATA, 2020. 95 p. P. 33–35.
8. Міністерство внутрішніх справ України. *Статистика дорожньо-транспортних пригод за 2023–2024 рр.* Київ : МВС України, 2025. 156 с. С. 51–55.
9. Державна служба України з безпеки на транспорті. *Аналіз стану безпеки руху на автомобільному транспорті за 2024 рік.* Київ : ДСБТ, 2025. 89 с. С. 26–30.
10. Renčelj M., Lindov O., Pljakić M. *Assessment of Dangerous Goods Transport: Case Western Balkan Countries. Sustainability*. 2025. Vol. 17, Iss. 3. P. 12–18.
11. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. *Звіт про основні результати діяльності ДСНС України за 2024 рік.* Київ : ДСНС України, 2025. 204 с. С. 89–94.
12. Bęczkowska S. A. The Importance of the Human Factor in Safety for the Transport of Dangerous Goods by Road. *Archives of Transport*. 2021. Vol. 57, Iss. 1. P. 25–40.
13. Ковальов В. І., Коцюк О. П. Правові та організаційні аспекти управління ризиками під час перевезень небезпечних вантажів. *Вісник Національного транспортного університету*. 2022. Вип. 1(49). С. 112–119.
14. Савченко О. В., Кондратенко І. В. Підготовка кадрів для транспортно-логістичної галузі: компетентнісний підхід та стандарти ЄС. *Вісник НТУ. Серія «Транспортні технології»*. 2023. Вип. 52. С. 57–66.
15. Сидоренко С. М., Петренко Д. В. Організація взаємодії експедитора і перевізника при надзвичайних ситуаціях під час перевезення небезпечних вантажів. *Транспортні системи і технології*. 2024. Вип. 8. С. 83–89.

Selivanova N.Yu. INCIDENT AND EMERGENCY MANAGEMENT IN THE TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS BY ROAD: THE ROLE OF THE FREIGHT FORWARDER AS A COORDINATING LINK

The article addresses a problem that remains insufficiently examined in both Ukrainian and European research on the safety of dangerous goods (DG) transport – the involvement of freight forwarders in managing incidents and emergencies arising during road transportation. While the duties of drivers and carriers are precisely defined by the provisions of ADR and Directive 2008/68/EC, the freight forwarder's role in the emergency response system remains largely informal, creating a gap between actual managerial responsibilities and the scope of regulatory frameworks.

Drawing on the analysis of international and national legislation – including the European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR), the UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, the Directive 2008/68/EC, and Ukrainian regulatory acts – as well as open statistical data from the Ministry of Internal Affairs and the State Emergency Service of Ukraine for 2023–

2024, the study establishes that accidents directly involving dangerous goods constitute less than 0.1 percent of all road crashes, yet the consequences of these incidents are disproportionately severe for human health, the environment, and critical infrastructure [1, p. 45–49; 2, p. 102–107; 8, p. 51–55]. This finding demonstrates that safety in DG transport depends not only on technical compliance and infrastructure reliability, but also on the timeliness, communication quality, and coherence of management decisions – areas in which the freight forwarder serves as a pivotal information and coordination link between the carrier, cargo owner, and emergency services.

A critical review of works by leading scholars – A. Majlingová, N. Batarlienė, J. Flodén, M. Renčelj, S. Bęczkowska, among others – reveals that contemporary research focuses primarily on risk assessment, regulatory harmonization, infrastructure limitations, and technical safeguards. However, the human and organizational dimensions of the freight forwarder's role at the time of an incident remain largely overlooked [4, p. 65–66; 5, p. 72–74; 6, p. 41–44; 10, p. 12–13; 13, p. 114–116; 14, p. 60–62; 15, p. 87–88]. This analytical gap underscores the need for a scientifically grounded framework describing how freight forwarders interact with other stakeholders in emergency and high-risk situations.

The article introduces a five-stage model of incident management – “warning – detection – notification – response – recovery” – in which the freight forwarder functions as the central information and coordination hub. A structured incident report card and a RACI-based matrix of responsibilities are presented to formalize the distribution of tasks among the carrier, freight forwarder, cargo owner, and civil protection authorities. Institutionalizing the freight forwarder's position within the official communication and response chain is shown to reduce the time required for hazard identification, limit information losses, enhance the coherence of participants' actions, and contribute to safer and more effective emergency operations.

The research findings hold practical significance for the modernization of national emergency response plans, the development of standardized communication protocols in the transport sector, and the integration of the topic “Hazardous Materials Incident Management” into higher-education curricula and professional training programs for freight forwarders and logistics specialists.

Key words: dangerous goods, road transport, incident management, emergency response, freight forwarder, ADR, organizational interaction, human factor.

Дата надходження статті: 31.10.2025

Дата прийняття статті: 18.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Соколова О.Є.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Чередніченко К.В.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ОЦІНКА НЕГАТИВНИХ НАСЛІДКІВ ВІЙНИ В УКРАЇНІ ДЛЯ ЄВРОПЕЙСЬКИХ АВІАПЕРЕВІЗНИКІВ

Російська військова агресія проти українського суверенітету та пов'язані з цим обмеження призвели до уповільнення темпів розвитку глобального ринку авіаційних вантажних та пасажирських перевезень. Особливо відчули негативних наслідків авіакомпанії, що спеціалізуються на формуванні найкоротших маршрутів між Європою та Азією. Заборона європейським авіаперевізникам здійснювати польоти через російську та українську території призвели до необхідності зміни траєкторії польоту із збільшенням довжини маршруту на 15% – 40%. Введені обмеження перетину російського простору не торкнулися перевізників окремих країн, зокрема Китаю, що надало їм певні конкурентні переваги за дальністю та часом виконання рейсів на європейсько-азіатських напрямках.

У даній науковій роботі проведено аналіз глобального ринку авіаційних вантажних перевезень та оцінено вплив військової конфлікту в Україні на ключові показники його діяльності. На прикладі дослідження авіаліній з Франкфурта, Варшави та Гельсінкі до Японії, Південної Кореї та Китаю розраховано операційні витрати та викиди CO₂ авіакомпаній, що виконують рейси за цими маршрутами при експлуатації існуючого у авіаперевізників флоту далекомагістральних літаків.

Розрахунки постійних витрат, а також викидів CO₂ при експлуатації парку далекомагістральних літаків на подовжених повітряних лініях обраних європейських авіакомпаній показали їх зростання на 15,69% – 39,41% та 8,10% відповідно. При цьому, витрати авіакомпаній-конкурентів майже залишаються не змінними, що свідчить про можливість переорієнтації вантажопотоків та зміни ключових гравців на досліджуваному ринку авіаперевезень.

За результатами проведеного наукового дослідження доведено, що війна Росії проти України призвела не лише до зміни мережі повітряних ліній між Європою та Азією, траєкторії польоту, погіршення фінансово-економічного стану окремих авіаперевізників та, як наслідок, негативного впливу не тільки на ключові показники функціонування європейського ринку вантажних перевезень та глобального авіаційного сектору в цілому, але й наносить значну шкоду навколишньому середовищу.

Ключові слова: військова агресія росії проти України, собівартість льотної години АСМІГ, постійні витрати, викиди CO₂, ринок вантажних перевезень, європейсько-азіатські авіаційні маршрути.

Постановка проблеми. Із закриттям авіаційних просторів Росії та України, особливо постраждали європейські авіакомпанії, що здійснюють перевезення до Азії, які вимушені були змінити траєкторію польотів із подовженням довжини повітряних ліній із прокладанням нових маршрутів через південь, оминаючи небезпечні геополітичні території на Близькому Сході, та тим самим зазнали зростання експлуатаційних витрат, збільшення викидів вуглекислого газу (CO₂) та скорочення попиту на деяких авіаційних напрямках. Крім фінансових втрат, європейські авіаперевізники стикнулися зі значною конкуренцією на окремих маршрутах з боку китайських авіакомпаній, які уникнули прямих обмежень

щодо перетину російської території та, тим самим, отримали переваги за часом, дальністю та собівартістю перевезення.

Разом зі збільшенням часу польоту та паливних витрат, також зменшилася ємність для здійснення вантажних і чартерних авіаперевезень. Так, Lufthansa Cargo за результатами свого оцінювання визнала, що вимушені об'їзти російського повітряного простору коштували авіакомпанії приблизно 10% її операційних потужностей у 2022 р. І аналогічна ж ситуація склалася й серед більшості її європейських конкурентів [1].

Згідно з аналітичними даними консалтингової компанії Seabury, обсяг прямих вантажних авіа-

перевезень між Європою та Північно-Східною Азією впав на 20% одразу після вторгнення Росії, що становить понад 1100 т на день або еквівалентно дев'яти вантажним літакам Boeing 747, які більше не доступні [2].

Частково це пов'язано й з тим, що українська авіакомпанія «Авіалінії Антонова», яка здійснювала майже 35% всіх надважких та великогабаритних вантажів у світі, тепер фактично експлуатує всі свої літаки Ан-124 виключно в гуманітарних цілях. Через скорочення ємності повітряних суден та зменшення частоти польотів спостерігається значне відставання та зростання тарифів на вантажні авіаперевезення. Але, наприклад, завдяки підвищенню ціни на доставку вантажів, Finnair продовжує обслуговувати пасажирські рейси на ключових азійських ринках навіть при збільшенні їх тривалості [2].

Безумовно, постійне зростання вантажних тарифів, в умовах часової невизначеності щодо військового конфлікту, може стати причиною скорочення попиту та гальмування розвитку даного сегменту не тільки на стратегічних європейсько-азійських маршрутах, але й на рівні загальносвітової авіатранспортної індустрії.

Саме тому, для можливості пошуку альтернативних рішень щодо подальшого ефективного функціонування авіаційного сектору актуальним питанням є проведення оцінки наслідків впливу військового тероризму в Україні на діяльність європейських авіаперевізників, що спеціалізуються на перевезеннях між Європою та Азією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення проблеми впливу на глобальний та регіональні ринки авіаперевезень будь-яких кризових ситуацій серед яких: пандемії та військових конфліктів, завжди мали значний інтерес у науково-практичному середовищі. Зокрема, актуальними стали питання з прогнозування відновлення світових пасажиропотоків та вантажопотоків у постковідний період із можливим передбаченням нових епідемій в умовах нестабільного попиту на перевезення [6-8], а також оцінки негативних наслідків з початком війни в Україні для міжнародного авіаційного сектору [3-12].

Аналітичний звіт IATA містить детальний огляд впливу російсько-українського конфлікту на авіаційну галузь в секторі пасажирських та вантажних перевезень на регіональному, а також загальносвітовому рівнях, очікувані коливання цін на авіаційне паливо та викиди CO₂ [3].

В роботі [8] проведено дослідження змін, які викликала військова російська агресія в Україні

на глобальному ринку авіаперевезень у період з березня по травень 2022 р. Зокрема, було проаналізовано зміни у авіаційному трафіку на ключових ринках та маршрутах у зв'язку із закриттям авіаційних просторів Росії та України, визначені очікувані втрати для авіаційної та туристичної галузі, а також наведено результати впливу конфлікту на міжнародну авіаційну безпеку.

Українські вчені Остроумов І., Іващук О. та Кузьменко Н. у своїх наукових розробках [9, 10] провели статистичну оцінку збитків регулярних авіаперевізників з причини скасування рейсів з території України, втрати кількості ненаданих місць та параметру доступних місць-кілометрів, а також зміни довжини та траєкторії польотів за транзитними маршрутами в обхід українського авіаційного простору. Але при цьому результати проведених досліджень стосуються більш українського ринку авіаперевезень та опосередковано відображають зв'язок з глобальними показниками.

Кількісну оцінку впливу російсько-українського конфлікту на світову міжнародну авіацію з точки зору зміни масових траєкторій польоту проведено китайськими дослідниками [11]. У представленій роботі, автори визначили величину зростання вартості перельотів (на світові міжнародні авіаперевезення темп зростання – 0,637%) та відрахувань авіакомпаній, спричинених військовими діями в Україні. Також, науковці торкнулися проблеми переміщення українських біженців з транспортної точки зору та визначили основні маршрути евакуації та просторовий розподіл потоків українських громадян із підтвердженням статистичних даних ООН.

Вплив російської військової агресії в Україні на глобальну екосистему при виконанні пасажирських авіаційних перевезень проаналізовано в науковій статті Іваннікової В., Соколової О. та Чередніченко К.

У представленому дослідженні [12], на основі побудови SARIMA Model вченими розроблено прогноз глобальних авіаційних викидів CO₂ на найближчі п'ять років за двома різними сценаріями розвитку військового конфлікту на території України, що надає можливість передбачити наслідки та прийняти стратегічні рішення щодо запровадження відповідних заходів для стабілізації ситуації в екосистемі.

Отже, проведений аналіз науково-практичної літератури свідчить про значний внесок науковців та провідних авіаційних фахівців у вирішення питань щодо оцінки впливу довготривалої війни в Україні на загальносвітову авіатранспортну сис-

тему. Разом з цим, слід відзначити, що переважна кількість наукових праць присвячені аналізу змін траєкторії, часу та частоти польотів за подовженими пасажирськими авіалініями між Європою та Азією через закриття українського авіаційного простору та введенні обмеження щодо перетину російської території. При цьому, дослідження щодо наслідків та очікувань для глобального вантажного авіаційного сектору від довготривалої військової конфліктної ситуації майже відсутні та лише фрагментарно розкривають окремі її аспекти. Тому, дана стаття спрямована на вирішення актуального завдання щодо оцінки впливу війни України на світовий ринок авіаційних вантажних перевезень, а також експлуатаційну діяльність окремих провідних європейських авіаперевізників за стратегічними європейсько-азіатськими маршрутами.

Постановка завдання. Метою статті є оцінка впливу війни в Україні на діяльність європейських авіакомпаній, що спеціалізуються на вантажних та пасажирських перевезеннях між Європою та Азією.

Виклад основного матеріалу. Як свідчать статистичні дані, глобальний ринок авіаційних перевезень за останні 20 років в цілому характеризується повільними, але майже стабільними темпами зростання. Під час пандемії Covid-19, коли падіння загальносвітових пасажиропотоків склало майже 60%, обсяги перевезених вантажів скоротилися лише на 9,9% за результатами 2020 р. порівняно з 2019 р. При цьому, вже у 2021 р. глобальний вантажопотік авіаційного транспорту досяг позначки 65,6 млн. метр. т, що на 18,23% більше ніж у попередньому 2020 р. та на 6,5% ніж у 2019 р. і є максимальним значенням за двадцятирічний період [13-15].

Із закриттям авіаційного простору України з початком повномасштабної війни було введено заборону на виконання рейсів російськими авіакомпаніями до ЄС, США, Канади та ін. Із введеннями обмеженнями припинили свої польоти до країн, що підтримали український суверенітет та засудили військовий тероризм найбільші авіаперевізники країни-агресора, серед яких: «Аерофлот», S7, «Волга-Дніпро», «Газпром-АВІА», «Уральські авіалінії», «Росія», Utair, «Перемога», Red Wings, IFly, Nord Wind, «Якутія», «Ямал», «Алроса», «Авіастар-ТУ», БАТ «Державна компанія 224 льотний авіазагін», корпорація «Іркут», компанії «Туполєв» і «Беріїв».

У відповідь на запроваджені санкції російським урядом було закрито небо для авіакомпаній країн, що прийняли активну позицію у підтримці

України. У зв'язку з цим, європейські авіаперевізники вимушені були перебудовувати мережу маршрутів між Європою та Азією та змінювати траєкторію авіаліній із збільшенням їх довжини в обхід української та російських територій. Безумовно, все це негативно позначилося не тільки на діяльності окремих авіаперевізників, але й на загальносвітових показниках.

Так, за результатами 2022 р. глобальний обсяг перевезених вантажів скоротився на -8,08% у порівнянні з 2021 р. У 2023 р. досліджуваний показник скоротився ще на 4,31% проти 2022 р. та на 12,04% відносно 2021 р. З урахуванням кризових ситуацій та потрясінь, фахівці IATA все ж таки відзначають поживлення загальносвітового ринку вантажних авіаційних перевезень у 2024 р. [15].

Статистичні дані показують, що не дивлячись на постійні коливання вантажопотоків між двома ринками з березня 2023 р. спостерігається поступове відновлення та, хоч і не значна, але стійка динаміка зростання показника як з Європи до Азіатсько-Тихоокеанського регіону, так і з країн Азіатсько-Тихоокеанського регіону до Європи.

Для можливості оцінки впливу війни в Україні на загальносвітовий ринок вантажних перевезень, а також на діяльність окремих авіакомпаній обрані маршрути між Європою та Азією, які на думку фахівців, постраждали найбільше з причини закриття неба над Україною та Росією.

З метою проведення практичного експерименту та визначення темпів змін операційних витрат викидів CO₂ авіакомпаній до та після початку військового конфлікту авторами проаналізовані обсяги перевезених вантажів між провідними європейськими хабами (Франкфурт, Варшава, Гельсінкі) та Японією (Токіо), Південною Кореєю (Сеул), а також Китаєм (Пекін, Шанхай).

Аналіз вантажопотоків з аеропорту Франкфурт до Пекіну, Токіо та Сеулу показав, що найбільшим попитом користується авіаційний маршрут до Південної Кореї, за яким фіксується найбільше значення показника. Але важливо звернути увагу, що у період з 2022 р. по 2025 р. обсяги вантажних перевезень між Франкфуртом та Сеулом скоротилися на 64,64% (рис. 1).

Статистичні дані показують, що найбільший обсяг перевезених вантажів спостерігається на маршруті між Варшавою та Сеулом, але починаючи з II кв. 2022 р. показник повільними темпами знижується (рис. 2).

За результатами 2022 р. вантажопотік з Варшави до Пекіну мав тенденцію падіння, але вже на початку 2023 р. поступово відновлюється. Най-

більше скорочення обсягів перевезених вантажів між Варшавою та Токіо зафіксовано у I кв. та III кв. 2022 р., при цьому IV кв. 2022 р. та I кв. 2023 р. вантажопотік характеризується позитивною динамікою розвитку.

Слід відзначити, що авіаційний сектор Фінляндії з початком війни в Україні належить до найбільш постраждалих серед інших країн ЄС. Закриття російського неба для авіакомпанії Finnair та заборона виконання польотів через транзитний трансибірський коридор призвело до суттєвого збільшення довжини польотів, експлуатаційних витрат та викидів CO₂ на популярних маршрутах до Китаю, Японії та Південної

Кореї. Проведений аналіз статистичних даних свідчить про суттєве скорочення вантажопотоків з Гельсінкі до Токіо, Сеулу та Шанхаю починаючи з I кв. 2022 р. (рис. 3).

З урахуванням падіння попиту на досліджуваних стратегічних маршрутах після початку військового конфлікту в Україні, на ринку авіаперевезень фактично склалася конкуренція між європейськими та китайськими авіакомпаніями, які з-за відсутності заборони на виконання польотів через російську територію, мають суттєві переваги за часом та траєкторією польотів (табл. 1).

Дані табл. 2 показують, що дальність виконання рейсу за конкурентними повітряними

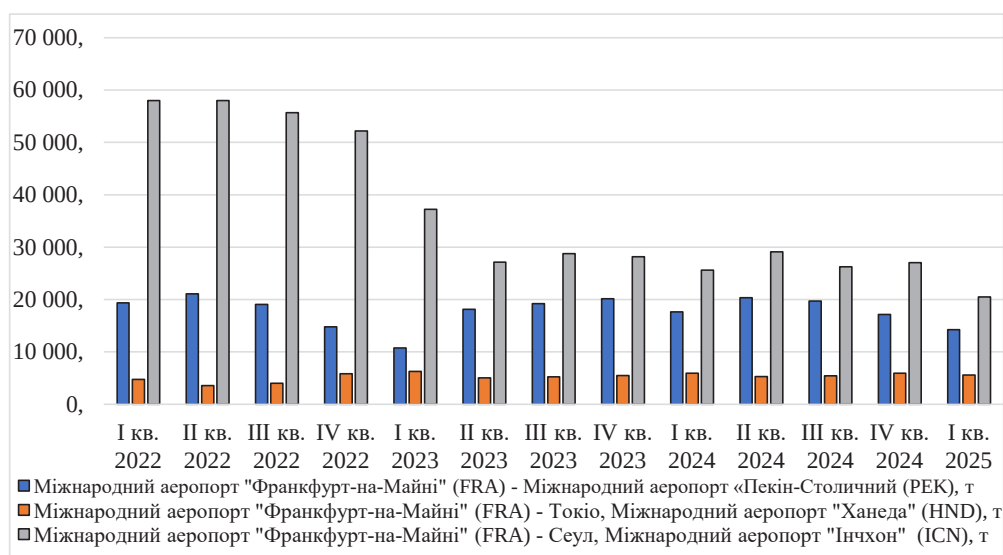


Рис. 1. Обсяги перевезених вантажів з Міжнародного аеропорту «Франкфурт-на-Майні» до Китаю, Японії та Південної Кореї [16]

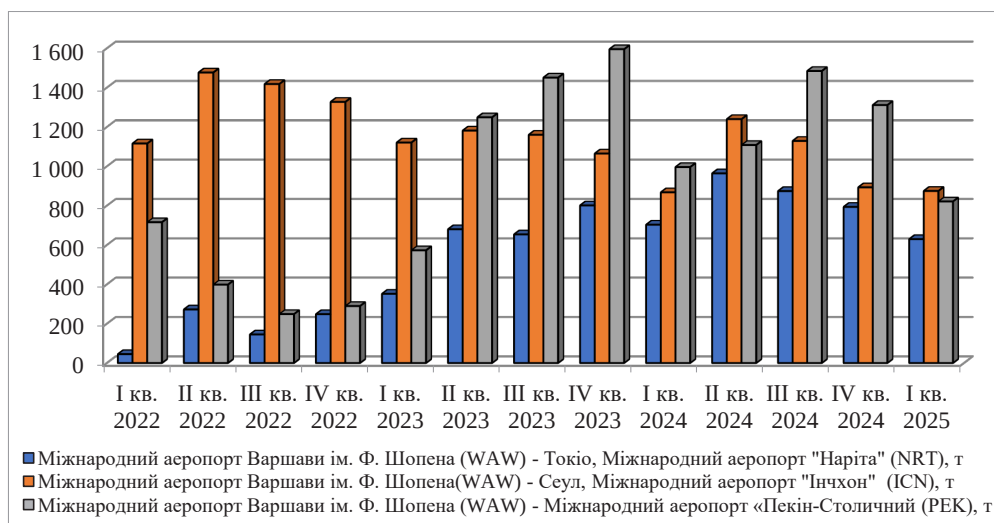


Рис. 2. Обсяги перевезених вантажів з Міжнародного аеропорту Варшави ім. Ф. Шопена (WAW) до Китаю, Японії та Південної Кореї [16]

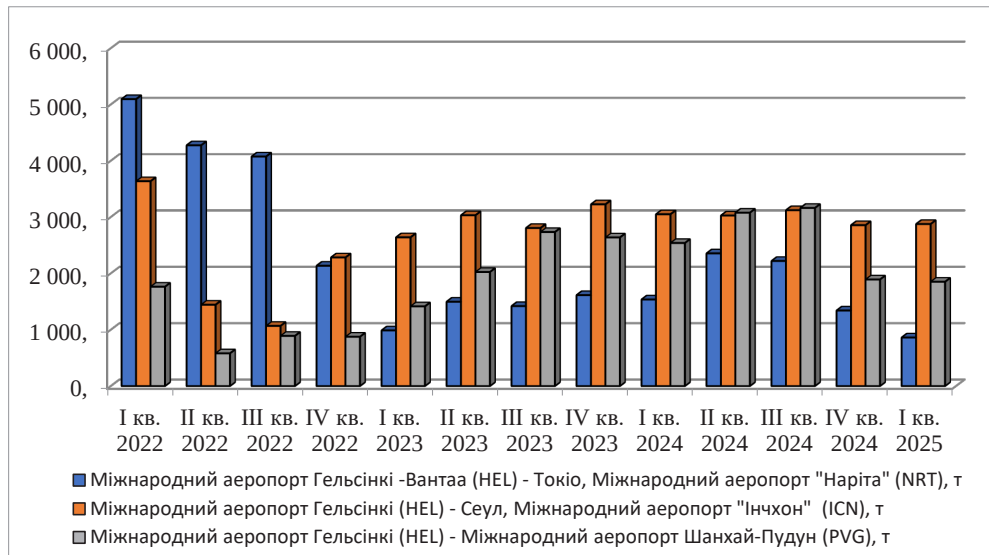


Рис. 3. Обсяги перевезених вантажів з Міжнародного аеропорту Гельсінкі (HEL) до Китаю, Японії та Південної Кореї [16]

Таблиця 1

Фактичні рейси за обраними маршрутами між Європою та Азією [17]

№	Маршрут	Авіакомпанія	№ рейсу	Тип ПС	Частота рейсів на тиждень	Відстань польоту			
						До введення обмежень, км	Фактична, км	Зміни, км	Зміни, %
1.	HEL - PVG	Finnair	AY87	A350-900	2	7402	10623	3221	43,5
	HEL - PVG	Juneyao Airlines	HO1608	B787-9	4	7402	7641	239	3,2
2.	HEL - NRT	Finnair	AY73	A350-900	4	7838	10969	3131	39,9
3.	HEL - ICN	Finnair	AY41	A350-900	4	7039	10506	3467	49,3
4.	WAW - PEK	LOT Polish	LO91	B787-8	7	6952	8678	1726	24,8
	WAW - PEK	Air China	CA738	A330	2	6952	7534	582	8,4
5.	WAW - NRT	LOT Polish	LO79	B787-9	6	8623	11062	2439	28,3
6.	WAW - ICN	LOT Polish	LO97	B787-8, B787-9	4	7734	9606	1872	24,2
7.	FRA - PEK	Lufthansa	LH720	A340-300	7	7799	9190	1391	17,8
	FRA - PEK	Air China	CA932	B777-300	7	7799	7886	87	1,1
	FRA - PEK	Lufthansa CARGO	LH8436	B777-200LR	1	7799	9166	1367	17,5
	FRA - PEK	Lufthansa CARGO	LH8430	B777-200LR	3	7799	9166	1367	17,5
	FRA - PEK	Air China CARGO	CA1042	B777-200LR, B747-400	2	7799	7964	165	2,1
8.	FRA - HND	Lufthansa	LH716	B747-8	6	9379	11469	2090	22,3
9.	FRA - ICN	Lufthansa	LH712	B747-400	7	8554	10101	1547	18,1
	FRA - ICN	Asiana Airlines	OZ542	A350-900	7	8554	10110	1556	18,2
	FRA - ICN	Korean Air	KE946	B777-300ER	5	8554	10112	1558	18,2

лініями, що здійснюються китайськими авіаперевізниками значно нижче ніж у європейських авіакомпаній. Наприклад, на маршруті Гельсінкі-Шанхай відстань польоту Juneyao Airlines майже на 40% менше ніж у фінської авіакомпанії Finnair.

Зауважимо, що авіакомпанії Lufthansa (LH) покищо вдається утримувати лідерські позиції за частотою рейсів у порівнянні з китайським авіаперевізником Air China – основним конкурентом на досліджуваних маршрутах, але в подальшому, із затягненням російсько-українського конфлікту та необхідністю збільшення тарифів на вантажні перевезення ситуація може змінитися.

У статті проведено розрахунки, а також порівняльну оцінку собівартості льотної години АСМІФ та постійних витрат авіакомпаній, які виконують фактичні рейси за маршрутами з Гельсінкі, Варшави, Франкфурту до Китаю, Японії та Південної Кореї при експлуатації наявного парку далекомагістральних літаків. Операційні витрати авіакомпаній при виконанні одинарного рейсу на обраних маршрутах між Європою та Азією OC_{ij} розраховані із використанням методики визначення собівартості льотної години АСМІФ та часу на виконання рейсу при експлуатації різних типів далекомагістральних літаків, з урахуванням витрат на аеронавігаційні та аеропортові збори таким чином:

$$OC_{ij} = ACMIF_i \cdot t_j + AN_{ij}, \quad (1)$$

де, $ACMIF_i$ – собівартість льотної години i -го типу літака (A_i – витрати на амортизацію літака, C_i – витрати на персонал, M_i – витрати на технічне обслуговування літака, I_i – витрати на страхування, F_i – витрати на авіаційне паливо); t_j – час

на виконання j -го рейсу; AN_{ij} – аеропортові та аеронавігаційні збори при виконанні j -го рейсу i -м типом літака.

Аеронавігаційні та аеропортові витрати за авіалініями розраховані, згідно діючих тарифів аеропортів відправлення та призначення, а також встановлених ставок за послуги з аеронавігаційного обслуговування повітряних суден у повітряному просторі районів польотної інформації країн на маршруті, а також на підході та в районі аеродромів.

Обсяг викидів CO₂ на обраних авіаційних маршрутах визначено на основі Методології ІКАО (ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology) [18, 19] із використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

Отримані числові дані підтверджують, що на досліджуваних повітряних лініях китайські авіаперевізники мають суттєві конкурентні переваги над європейськими за постійними витратами виконання польотів (табл. 2–4).

Проведений числовий експеримент показує, що на маршруті Гельсінкі (HEL) – Шанхай (PVG) постійні витрати Finnair при експлуатації Airbus A350-900 на 36,21 % вище ніж у Juneyao Airlines, яка виконує політ без обмежень через російський авіаційний простір (табл. 2).

Дані табл. 1 показують, що максимальне зростання постійних витрат для Finnair відбулося на авіалінії між Гельсінкі (HEL) та Сеулом (ICN) (темп зростання – 43,95% при експлуатації літака Airbus A330-300 та 44,3% при експлуатації Airbus A350-900).

Для LOT Polish конкурентом на маршруті Варшава (WAW) – Пекін (PEK) є Air China, постійні

Таблиця 2

Результати розрахунку АСМІФ та постійних витрат авіакомпаній на маршрутах з Гельсінкі до Шанхаю, Токіо, Сеулу

Маршрут	Авіакомпанія	Тип ПС	АСМІФ за типами ПС, євро	Постійні витрати за типами ПС			
				Постійні витрати за типами ПС до введення обмежень, євро	Постійні витрати за типами ПС після введення обмежень, євро	Зміни, євро	Зміни, %
HEL – PVG	Finnair	A330-300	17313,19	168505,18	234275,63	65770,45	39,03
		A350-900	20761,27	198375,29	275952,75	77577,46	39,11
	Juneyao Airlines	B787-9	20015,15	190666,74	196200,81	5534,06	2,90
HEL – NRT	Finnair	A330-300	17313,19	177407,98	241340,70	63932,72	36,04
		A350-900	20761,27	208876,30	284286,13	75409,82	36,10
HEL – ICN	Finnair	A330-300	17313,19	161092,99	231886,58	70793,59	43,95
		A350-900	20761,27	189632,47	273134,82	83502,35	44,03

витрати якої при виконанні рейсу в середньому на 14,7% менше ніж у європейського авіаперевізника (табл. 3).

Розрахункові дані свідчать (табл. 3), що найбільше зростання постійних витрат для LOT Polish відбулося при виконанні рейсу з Варшави (WAW) до Токіо (аеропорт Наріта, NRT). В середньому, за досліджуваними авіалініями, постійні витрати збільшилися на 23,9% після введених обмежень з початком війни в Україні.

При виконанні вантажних перевезень між аеропортами Франкфурта (FRA) та Пекіном (PEK) постійні витрати Lufthansa Cargo (LH Cargo) на 14,69% вище ніж у Air China Cargo при експлуатації аналогічного типу літака B777-200LR(F) (табл. 4).

Відзначимо, що авіакомпанія Lufthansa найбільше постраждала на маршруті до Японії, за яким постійні витрати після заборони виконання польотів через російський авіаційний простір збільшилися на 21,05% при експлуатації Boeing B747-8i. В середньому постійні витрати авіаперевізника на подовжених маршрутах зросли на 18,31%.

Викиди CO₂ на досліджуваних авіалініях обчислено із використанням Методології ІКАО [18, 19], з урахуванням довжини маршрутів до та

після закриття повітряних просторів України та Росії при експлуатації наявного у авіаперевізників флоту далекомагістральних літаків.

При відсутності вантажних рейсів за обраними маршрутами обсяг викидів CO₂ визначався при умові 70% комерційного завантаження пасажирського літака із дозавантаженням 1 т вантажу.

Динаміку змін викидів CO₂ авіакомпанії Finnair Airlines до та після початку війни в Україні на обраних авіалініях у порівнянні з китайською авіакомпанією Juneyao Airlines показано на рис. 4.

Наведені на рис. 4 дані показують, що середнє значення викидів CO₂ на досліджуваних маршрутах авіакомпанії Finnair між Європою та Азією збільшилося на 17,71% після введення обмежень на польоти. При цьому, обсяги викидів CO₂ китайського авіаперевізника Juneyao при експлуатації аналогічної повітряної лінії зросли лише на 1,29% після введених санкцій.

Також, на основі проведених розрахунків, встановлено перевагу китайської авіакомпанії Air China Airlines над авіакомпанією LOT Polish за обсягами викидів CO₂ на конкурентному маршруті після початку військової російської агресії в Україні (рис. 5). Визначено, що в середньому викиди CO₂ на маршрутах LOT Polish Airlines між Європою та Азією збільшилися на 10,58% після

Таблиця 3

**Результати розрахунку АСМІФ та постійних витрат авіакомпаній
на маршрутах з Варшави до Шанхаю, Токію, Сеулу**

Маршрут	Авіакомпанія	Тип ПС	АСМІФ за типами ПС, Євро	Постійні витрати за типами ПС			
				Постійні витрати за типами ПС до введення обмежень, Євро	Постійні витрати за типами ПС після введення обмежень, Євро	Зміни, Євро	Зміни, %
WAW - PEK	LOT Polish	B787-8	17193,49	155682,72	190198,03	34515,31	22,17
		B787-9	20015,15	180174,05	220174,34	40000,29	22,20
	Air China	A380-900	36069,68	325328,04	349368,94	24040,90	7,39
		A330-300	17994,12	168174,92	180786,11	12611,19	7,50
		A330-200	16502,15	152419,30	163784,34	11365,04	7,46
		B777-300ER	24070,92	214402,42	230321,37	15918,95	7,42
		B787-900	20015,15	180174,05	193661,98	13487,93	7,49
		B747-8i	30657,89	271706,97	291878,22	20171,26	7,42
WAW - NRT	LOT Polish	B787-8	17193,49	189098,18	237871,56	48773,38	25,79
		B787-9	20015,15	218899,70	275423,86	56524,16	25,82
WAW - ICN	LOT Polish	B787-8	17193,49	171320,59	208755,51	37434,92	21,85
		B787-9	20015,15	198297,01	241680,86	43383,86	21,88

Результати розрахунку АСМІґ та постійних витрат авіакомпаній
на маршрутах з Франкфурту до Пекіну, Токію, Сеулу

Маршрут	Авіакомпанія	Тип ПС	АСМІґ за типами ПС, євро	Постійні витрати за типами ПС			
				Постійні витрати за типами ПС до введення обмежень, євро	Постійні витрати за типами ПС після введення обмежень, євро	Зміни, євро	Зміни, %
FRA - PEK	LH	A380-800	30811,24	315975,12	366112,60	50137,48	15,87
		A350-900	21161,71	226000,55	262607,67	36607,12	16,20
		A340-600	20292,33	213762,63	247783,67	34021,04	15,92
		A340-300	17402,43	182521,74	211721,35	29199,61	16,00
		A330-300	17994,12	189984,73	220625,95	30641,21	16,13
		B747-8i	30657,89	305279,01	354166,02	48887,01	16,01
		B747-400	22563,56	229872,20	266383,82	36511,63	15,88
	LH CARGO	B777-200LR(F)	21906,79	224964,53	260258,40	35293,87	15,69
	Air China	A380-900	36069,68	364885,11	368527,69	3642,58	1,00
		A330-300	17994,12	189924,81	191841,27	1916,45	1,01
		A330-200	16502,15	172415,55	174145,72	1730,17	1,00
		B777-300ER	24070,92	241475,07	243892,39	2417,33	1,00
		B787-900	20015,15	203314,62	205362,90	2048,28	1,01
		B747-8i	30657,89	305279,01	308336,64	3057,63	1,00
		B747-400	22563,56	229872,20	232155,81	2283,62	0,99
	Air China CARGO	B744-400F	24007,79	245850,35	248300,54	2450,20	1,00
		B777-200LR(F)	21916,79	225056,54	227303,71	2247,17	1,00
FRA - HND	LH	A380-800	30811,24	369729,38	447220,47	77491,09	20,96
		A350-900	21161,71	265391,85	321873,90	56482,05	21,28
		A340-600	20292,33	249851,86	302694,59	52842,73	21,15
		A340-300	17402,43	213472,04	258842,43	45370,39	21,25
		A330-300	17994,12	229057,17	277837,03	48779,86	21,30
		B747-8i	30657,89	358001,64	433351,27	75349,63	21,05
		B747-400	22563,56	268689,85	325342,66	56652,82	21,08
FRA - ICN	LH	A380-800	30811,24	340046,83	399788,71	59741,87	17,57
		A350-900	21161,71	243717,17	287158,08	43440,91	17,82
		A340-600	20292,33	229717,13	270736,21	41019,09	17,86
		A340-300	17402,43	196191,20	231427,49	35236,29	17,96
		A330-300	17994,12	210389,75	248042,55	37652,80	17,90
		B747-8i	30657,89	329054,19	386920,99	57866,80	17,59
		B747-400	22563,56	247079,65	290993,95	43914,30	17,77

зміни траєкторії польотів. Середні обсяги викидів CO₂ Air China Airlines на аналогічних маршрутах зросли лише на 3,21%.

Динаміку змін обсягів викидів CO₂ авіакомпанії Lufthansa до та після початку війни в Україні на обра-

них авіалініях при експлуатації різних типів далекомагістральних літаків у порівнянні з китайською авіакомпанією Air China Airlines показано на рис. 6.

Згідно даних рис. 6 встановлено, що середнє значення викидів CO₂ на маршрутах авіакомпанії

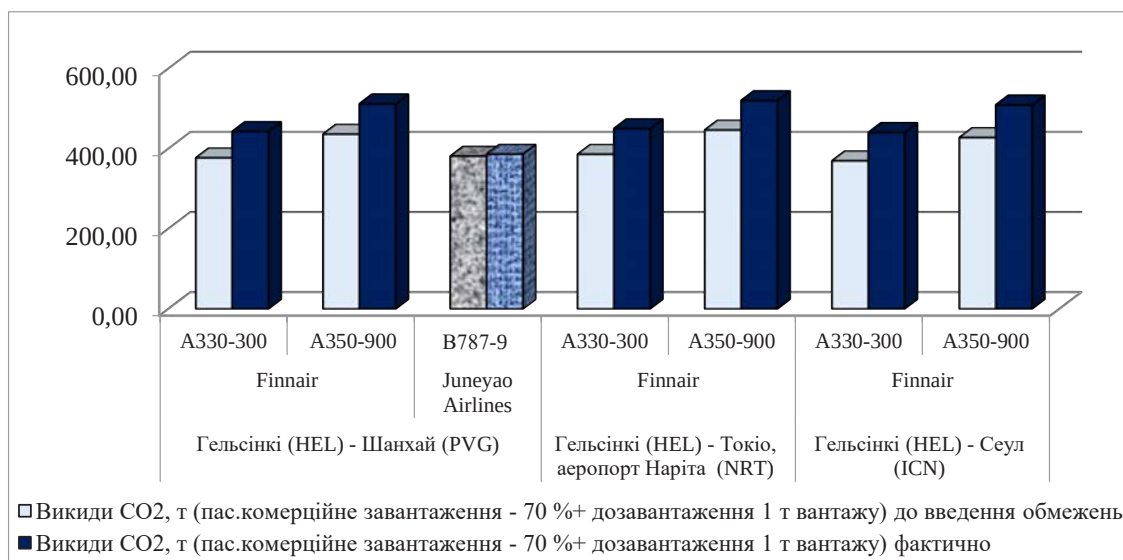


Рис. 4. Викиди CO₂ до та після введення обмежень на польоти: приклад авіакомпаній Finnair Airlines та Juneyao Airlines

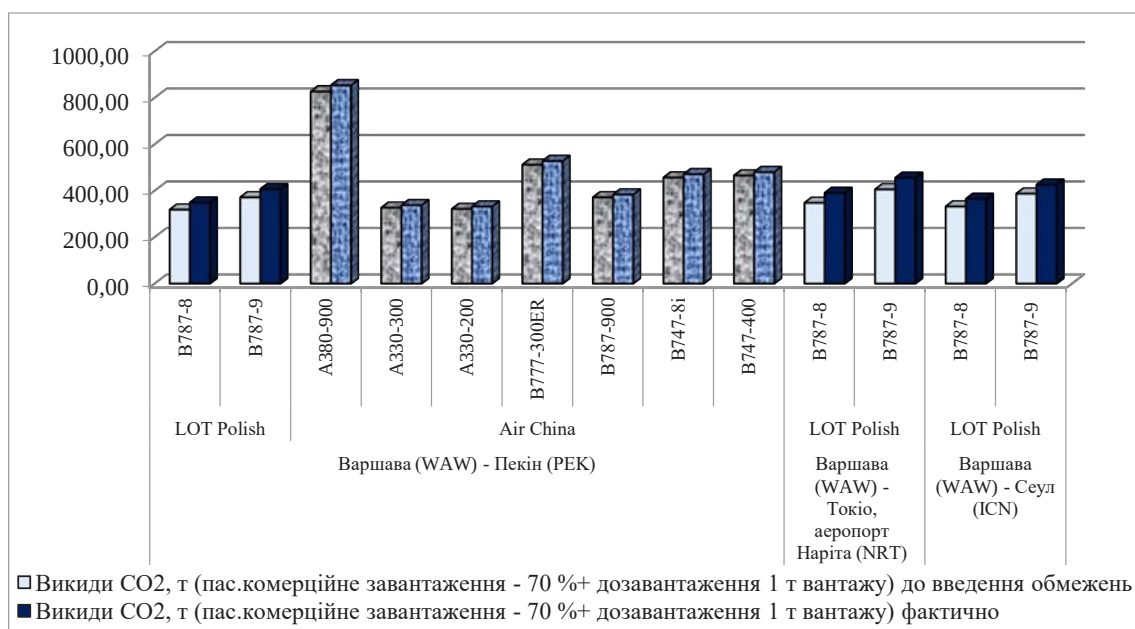


Рис. 5. Викиди CO₂ до та після введення обмежень на польоти: приклад авіакомпаній LOT Polish та Air China Airlines

Lufthansa між Європою та Азією збільшилися на 8,10% після введення обмежень та зміни траєкторії польоту. При цьому, середні викиди CO₂ на маршрутах авіакомпанії Air China між Європою та Азією збільшилися лише на 0,59% після введення обмежень на польоти.

Отже, проведені розрахунки доводять, що з початком війни в Україні зміна траєкторії польотів європейських авіаперевізників в обхід російського та українських авіаційних просторів та, тим самим, збільшення довжини маршрутів на досліджуваних повітряних лініях, призвела не тільки

до зростання постійних експлуатаційних витрат та фінансових втрат авіакомпаній, а й також й до негативних наслідків для екосистеми.

Висновки. Жорстка російська агресія в Україні, що розпочалася 22 лютого 2022 р., призвела до значних людських жертв, руйнування об'єктів цивільної та стратегічної інфраструктури, зокрема на авіаційному транспорті. Підтримавши український суверенітет країни ЄС, Канада, США закрили небо для російських повітряних суден та запровадили економічні санкції проти Росії. У відповідь на введені обмеження російський

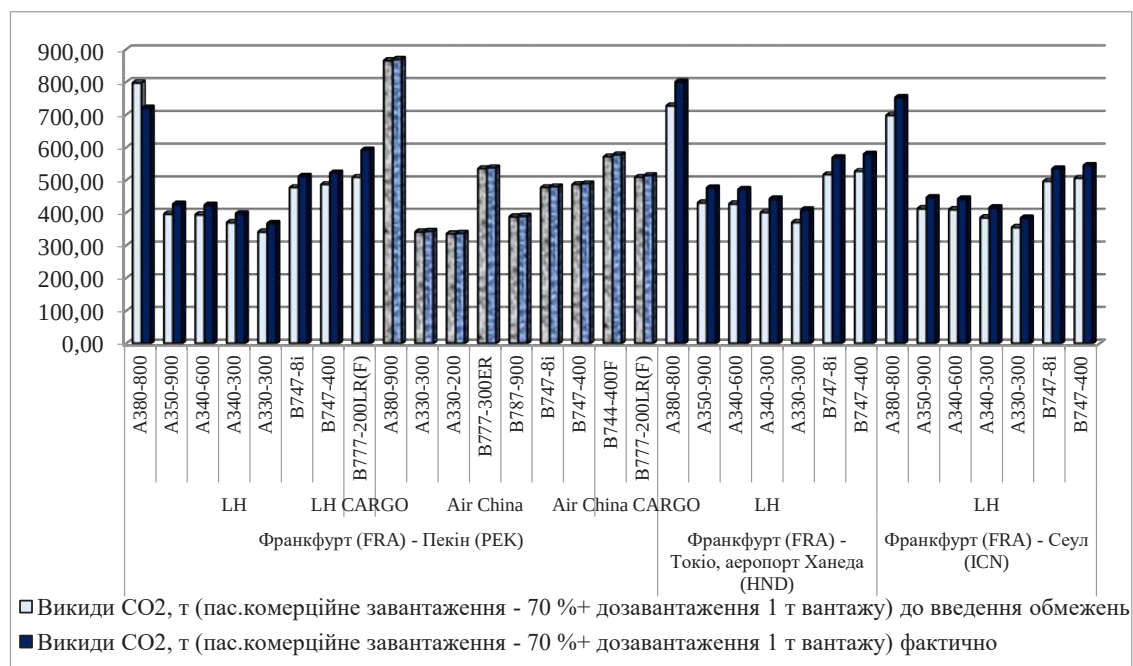


Рис. 6. Викиди CO2 до та після введення обмежень на польоти: приклад авіакомпаній Lufthansa та Air China Airlines

уряд заборонив польоти над своєю територією авіакомпаніям тих країн, що стали солідарними з Україною та засудили російський тероризм.

За результатами проведеного наукового дослідження доведено, що війна Росії проти України призвела не лише до зміни мережі повітряних ліній між Європою та Азією, траєкторії польоту, погіршення фінансово-економічного стану окремих авіаперевізників та, як наслідок, негативного впливу не тільки на ключові показники функціонування європейського ринку вантажних перевезень та глобального авіаційного сектору в цілому, але й на навколишнє середовище. Отримані розрахункові дані показують, що обліт повітряних просторів Росії та України з-за продовження військового конфлікту сприяє суттєвому збільшенню викидів

CO2 при експлуатації літаків європейських авіаперевізників порівняно з китайськими конкурентами, що може гальмувати досягнення цілей сталого розвитку в ЄС та формування «чистої» системи авіаційного транспорту у встановлені терміни.

Запропонований науковий підхід надає можливість провести порівняльну оцінку постійних витрат та викидів CO2 при експлуатації парку далекомагістральних літаків європейських авіакомпаній та авіаперевізників-конкурентів при перевезенні вантажів між Європою та Азією в умовах закриття російського та українського авіаційних просторів, що в подальшому дозволить передбачати поведінку досліджуваних показників за різними сценарними моделями розвитку військового конфлікту на території України.

Список літератури:

1. Air Cargo News. Lufthansa holds hope for a "good year". URL: <https://www.aircargonews.net/monthly-exclusive/lufthansa-holds-hope-for-a-good-year/>.
2. Air cargo helps Finnair restore some Asia service flying around Russia. URL: <https://www.freightwaves.com/news/air-cargo-helps-finnair-restore-some-asia-service-flying-around-russia>.
3. IATA Factsheet. The impact of the war in Ukraine on the aviation industry. URL: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-impact-of-the-conflict-between-russia-and-ukraine-on-aviation/>.
4. Impact of the Russian offensive in Ukraine on international tourism. UNWTO Tourism Market Intelligence and Competitiveness. URL: <https://www.unwto.org/impact-russian-offensive-in-ukraine-on-tourism>.
5. Röhlig Logistics GmbH & Co. Impact Of Russia-Ukraine Conflict On Air Cargo. URL: <https://www.rohlig.com/company/blog/impact-of-russia-ukraine-conflict-on-air-cargo>.
6. Suau-Sanchez P., Voltes-Dorta A., Cugueró-Escofet N. An early assessment of the impact of COVID-19 on air transport: Just another crisis or the end of aviation as we know it?. *Journal of Transport Geography*. 2020. 86. 102749.

7. Rothengatter W., Zhang J., Hayashi Y., Nosach A., Wang K., Oum T. H. Pandemic waves and the time after Covid-19 - Consequences for the transport sector. *Transport Policy*. 2021. 110. 225–237.
8. Akbarli A., Öndeş E. B., Gezer D., Açikel B. The Impact of the Ukraine-Russia Conflict on the Aviation Sector: February-May 2022. *Journal of Aviation*. 2022. 6(3). 346–354. <https://doi.org/10.30518/jav.1125560>.
9. Ostroumov I., Ivashchuk O., Kuzmenko N. Preliminary Estimation of war Impact in Ukraine on the Global Air Transportation», 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ruzomberok, Slovakia. 2022. pp. 281–284. URL: <https://doi.org/10.1109/ACIT54803.2022.9913092>.
10. Ivashchuk O., Ostroumov I. Impact of Closed Ukrainian Airspace on Global Air Transport System. In: Faure, E., Danchenko, O., Bondarenko, M., Tryus, Y., Bazilo, C., Zaspas, G. (eds) Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 178. Springer, Cham. 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_4.
11. Chen Chu, Hengcai Zhang, Jiayin Zhang, Lin Cong, Feng Lu (2023). Assessing impacts of the Russia-Ukraine conflict on global air transportation: From the view of mass flight trajectories. *Journal of Air Transport Management*. 115. 102522. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102522>.
12. Ivannikova V., Sokolova O., Cherednichenko, K. How the War in Ukraine Impacts Global Air Transportation Ecosystem: Assessment and Forecasting of Consequences. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. 2024. Part F2296. pp. 386–401. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52652-7_38.
13. IATA. Air Cargo Market Analysis. URL: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-cargo-market-analysis-december-2023/>.
14. FlightChic. Global Air Cargo Market Rebounds in 2023 Despite Economic Challenges. URL: <https://flightchic.com/2024/01/31/global-air-cargo-market-rebounds-in-2023-despite-economic-challenges/>.
15. Air Cargo Capacity Data. URL: <https://www.cargoai.co/resources/blog/>
16. Eurostat. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/main/data/database>
17. FlightAware. URL: <https://flightaware.com/>.
18. ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology. Version 12. 2023. URL: https://applications.icao.int/icec/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator_v12-2023.pdf.
19. ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology. 2023. *Air Freighter*. URL: https://applications.icao.int/icec/Freighter_Methodology_1.0.pdf

Sokolova O.Ye., Cherednichenko K.V. ASSESSMENT OF THE NEGATIVE CONSEQUENCES OF THE WAR IN UKRAINE FOR EUROPEAN AIRLINES

The Russian military aggression against Ukrainian sovereignty and the related geopolitical restrictions have significantly slowed the growth of the global air cargo and passenger transportation market. The most severe negative consequences have been experienced by airlines specializing in operating the shortest routes between Europe and Asia. The prohibition imposed on European air carriers to operate flights through Russian and Ukrainian airspace has resulted in the necessity to redesign existing flight trajectories, leading to an increase in route length by approximately 15%–40%. Restrictions on crossing Russian airspace have not been applied to carriers from several non-European countries, particularly China, which has provided them with noticeable competitive advantages in terms of flight distance, duration, and cost efficiency on Euro-Asian routes.

This research analyzes the global air freight market and assesses the impact of the ongoing military conflict in Ukraine on its key operational indicators. Using selected air routes from Frankfurt, Warsaw, and Helsinki to destinations in Japan, South Korea, and China, the study estimates operational costs and CO₂ emissions for airlines operating these connections with their current long-haul aircraft fleets.

The performed calculations demonstrate that the fixed operational costs and CO₂ emissions associated with the operation of long-haul aircraft fleets on extended routes of selected European airlines increased by 15.69%–39.41% and 8.10%, respectively. In contrast, the operating costs of competing airlines from Asia remained almost unchanged, highlighting a shift in competitive balance and potential redirection of air cargo flows, as well as the emergence of new dominant players in the examined segment of the air transport market.

The results of the conducted scientific research demonstrate that the war waged by Russia against Ukraine has led not only to the reconfiguration of air route networks between Europe and Asia and alterations in flight trajectories, but also to the deterioration of the financial and economic performance of certain air carriers. Consequently, it has exerted a negative impact on the key performance indicators of the European air freight market and the global aviation sector as a whole, while simultaneously causing substantial harm to the environment.

Key words: *russian military aggression against Ukraine, ACMI flight hour cost, fixed operational costs, CO₂ emissions, air freight market, Euro-Asian air routes.*

Дата надходження статті: 21.10.2025

Дата прийняття статті: 07.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Фоменко Г.Р.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ДОСТУПНІСТЬ МАЛОМОБІЛЬНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ ДО ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНИХ ВУЗЛІВ

Одним із сучасних напрямків розвитку поселень є формування міст зручних для життя. Взаємодія населення відбувається на територіях загального користування і рівень їх розвитку дає уявлення про якість міського простору. Необхідною складовою є формування комфортного, безпечного та доступного середовища, що орієнтоване на забезпечення потреб життєдіяльності всіх груп населення. Особлива увага повинна приділятися найбільш незахищеним групам до яких належать мало-мобільні групи населення. Доступність цих груп громадян до міських об'єктів значно ускладнюється внаслідок недостатнього рівня розвитку супутньої інфраструктури. На жаль від початку повномасштабної війни в Україні постійно зростає кількість людей з інвалідністю, якщо на початок 2022 року їх було 2,7 млн. людей, то за даними ВООЗ на середину 2025 року кількість інвалідів зростає до 3,4 млн. осіб. Ці показники постійно змінюються і збільшуються. Надто важливим є питання покращення інфраструктури на територіях міст, до яких належить транспортно-пересадочні вузли. Основними умовами які забезпечують ефективне функціонування транспортно-пересадочного вузла, є можливість забезпечення пересадки пасажирів, що користуються громадським та індивідуальним транспортом із досягненням максимально можливого комфорту і з мінімальними витратами часу. Максимальне забезпечення комфорту пасажирів можливе при використанні просторово-функціонального зв'язку між усіма основними елементами транспортно-пересадочного вузла у складі одного єдиного комплексу. Створення універсального середовища передбачає однаково зручне для всіх категорій громадян, а також першочергово враховувати потреби маломобільних груп населення. В світовій практиці формування громадських просторів за принципом «універсального» середовища є загальновизнаним показником якості міського простору, здібного не тільки ефективно виконувати свою функцію але і об'єднувати людей із різними фізичними можливостями, створювати повноцінним їх соціальне життя. Існуючі напрямки розвитку міст передбачають рівноправність всіх груп громадян і можливості забезпечення доступу до міських об'єктів і послуг, що створює передумови для формування інклюзивного середовища громадських просторів.

Ключові слова: територія міст, інфраструктура, транспортно-пересадочні вузли, пішохідні потоки, маломобільні групи населення, розвиток міст.

Постановка проблеми. Одним із сучасних напрямків розвитку поселень є формування міст зручних для життя. Взаємодія населення відбувається на територіях загального користування і рівень їх розвитку дає уявлення про якість міського простору. Саме тому розвиток громадського простору у містах є важливим напрямком для створення безпечних і комфортних громадських просторів. Громадськими просторами, для яких є характерною найбільша концентрація населення і інтенсивність транспортних та пішохідних зв'язків є території транспортно-пересадочних вузлів. Важливим та визначальним напрямком їх розвитку є забезпечення доступу до цих послуг кожного користувача. Система пішохідних комунікацій створює необхідні умови для забезпе-

чення зв'язків між його елементами: інфраструктурою різних видів транспорту, громадськими, рекреаційними та іншими об'єктами. Найбільш незахищеними для подолання територій транспортно-пересадочних вузлів є мало-мобільні групи населення. Нажаль доступ цих громадян до міських об'єктів значно ускладнюється внаслідок недостатнього рівня розвитку відповідної інфраструктури [1]. Важливим є розробка планувальних рішень у населених пунктах, які будуть відповідати параметрам і вимогам, що пред'являються до інклюзивного міського середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання покращення і доступності транспортної інфраструктури, роботи транспортно-пересадочних вузлів, переміщенню мало-мобільних груп

населення їх особливості розглядаються у роботах: Ломотько Д.В., Кравченко Д.М., Васильєвої А.В., Гарбель М.М. Івасенко В.В., Древаль І.В., Костюченко В.К., Соколової О.Є., Щурова В.А., Куцевич В.В., Дикань В.Л. та інші. В дослідженнях які проводились авторами поставлені актуальні проблеми що вирішують покращення умов переміщення мало-мобільних груп населення [1-7].

Постановка завдання. Метою даної статті є розгляд питань з підвищення безпеки пішохідних комунікацій елементів транспортної інфраструктури, планувальних рішень транспортно-пересадочних вузлів з врахуваннями руху мало мобільних груп населення.

Виклад основного матеріалу. Покращення якості життя людей у населених пунктах є важливою задачею. Необхідною складовою є формування комфортного, безпечного та доступного середовища, що орієнтоване на забезпечення потреб життєдіяльності всіх груп населення. Особлива увага повинна приділятися найбільш незахищеним групам до яких належать мало-мобільні групи населення. Доступність цих груп громадян до міських об'єктів значно ускладнюється внаслідок недостатнього рівня розвитку супутньої інфраструктури [2, 5, 6]. Світові тенденції по розвитку міського середовища вказують на необхідність реалізації комплексних планувальних і організаційних заходів по формуванню інклюзивного середовища і забезпеченню вільного переміщення людей з обмеженими можливостями. Визнаними за показником «доступних» міст Європи є Копенгаген (Данія), Відень (Австрія), Амстердам (Нідерланди), Париж (Франція), Барселона (Іспанія), Висбаден (Німеччина), Мілан (Італія). На жаль від початку повномасштабної війни в Україні постійно зростає кількість людей з інвалідністю, якщо на початок 2022 року їх було 2,7 млн. людей, то за даними ВООЗ на середину 2025 року кількість інвалідів зростає до 3,4 млн. осіб. Ці показники постійно змінюються і збільшуються. В залежності від типу поразки потребується тривале лікування з послідуною реабілітацією [3, 6, 8]. За роки війни необхідність в реабілітації збільшилася в декілька разів. Щорічно більше 250 тис. чоловік потребують як фізичної, так психологічної підтримки. Кабінет Міністрів України постановив затвердити «Порядок створення безбар'єрних маршрутів у населених пунктах». Вперше у м. Харків створено «Департамент інклюзивної доступності і безбар'єрного середовища». На Миколаївщині розроблено «Програму адаптації транспортної інфраструктури».

Надто важливим є питання покращення інфраструктури на територіях міст, до яких належить транспортно-пересадочні вузли. Основними умовами які забезпечують ефективне функціонування транспортно-пересадочного вузла, є можливість забезпечення пересадки пасажирів, що користуються громадським та індивідуальним транспортом із досягненням максимально можливого комфорту і з мінімальними витратами часу. Максимальне забезпечення комфорту пасажирів можливе при використанні просторово-функціонального зв'язку між усіма основними елементами транспортно-пересадочного вузла у складі одного єдиного комплексу. Комфортність і час пересадки у таких спорудах можливо забезпечити розвинутою системою пішохідних зв'язків, ядром якого є розподільчий пішохідний рівень, який називають комунікаційною зоною транспортно-пересадочного вузла. В такій комунікаційній зоні транспортно-пересадочного вузла можливо реалізувати основну задачу такої системи пішохідних зв'язків вузла, а саме: розподіл пасажиропотоків за напрямками і рівнями з мінімальною кількістю конфліктів при їх перетині. До основних комунікаційних елементів розподільчого рівня транспортно-пересадочного вузла із забезпеченням розподілу пішохідних потоків є система пішохідних галерей, сходові та позавузличних пішохідних переходів [2, 5, 7, 8].

Важливо передбачати якість обслуговування пасажирів у просторі комунікаційних елементів пересадочного комплексу в якому для кожної окремої ділянки будуть реалізовані такі умови руху:

- можливість руху на всьому протязі ділянки комунікаційного елемента зі швидкістю яка відповідає психофізіологічному стану людини на даний момент часу;
- можливість безперешкодного обгону пасажирів, які рухаються з меншою швидкістю;
- практично виключено дотик з іншими пасажирами при русі вперед і обгоні;
- можливість вільного вибору напрямку руху у будь-який момент.

В процесі вирішення питань по благоустрою міського середовища значну увагу треба приділяти маломобільним групам населення і створювати максимальну доступність і залучення у життя міст. Інтенсивність руху маломобільних груп населення на протязі дня постійно змінюється. Розробка організаційних заходів в процесі формування високоякісного міського середовища потребує врахування потреб маломобільних груп

і підвищення їх мобільності. До маломобільних груп населення можна віднести:

- особи із частковою втратою слуху;
- особи із частковою і повною втратою зору;
- особи із порушенням опорно-рухового апарату із однією або двома опорами;
- особи із дитячими візками;
- особи в колісних візках;
- особи з дітьми;
- вагітні жінки;
- особи похилого віку з порушенням опорно-рухового апарату і обмеженим зором.

Одним із важливим антропометричних факторів який треба враховувати при проектуванні є площа яку займає горизонтальна проекція тіла інваліда. Тому вище перелічені групи можна розділити на три категорії.

Перша категорія об'єднує людей по показникам антропометрії близьких до здорових. До цієї категорії відносяться необтяжені додатковими захворюваннями люди: із втратою слуху, із частковою втратою зору.

До другої категорії належать особи із повною втратою зору які користуються тростиною або допомогою поведиря.

У третю категорію включають інвалідів із порушенням опорно-рухового апарату яких розділяють на чотири групи: особи що не використовують додаткову опору, особи що користуються однією додатковою опорою, двома опорами і особи в колісних візках.

До четвертої категорії включають: особи з дітьми дошкільного віку і з дітьми у візках.

Треба відмітити, що врахування маломобільних груп населення в транзитному пішохідному потоці транспортно-пересадочного вузла значно знижує пропускну здатність комунікації [3, 4, 6, 9, 10]. При містобудівному формуванні якісного середовища планувальні рішення повинні забезпечувати ряд показників:

- комфортність переміщення груп населення;
- безпеку умов руху і очікування;
- безперешкодну доступність всіх груп населення до транспортних і громадських сервісів;
- найкоротші і прямолінійні зв'язки усередині транспортно-пересадочного вузла.

Створення універсального середовища передбачає однаково зручне для всіх категорій громадян, а також першочергово враховувати потреби маломобільних груп населення. В світовій практиці формування громадських просторів за принципом «універсального» середовища є загально-визнаним показником якості міського простору, здібного не тільки ефективно виконувати свою функцію але і об'єднувати людей із різними фізичними можливостями, створювати повноцінним їх соціальне життя. В цій ситуації основний наголос слід приділяти транспортно-пересадочним вузлам, тому що вони виступають як сполучна ланка різних видів громадського міського транспорту. До основних типів елементів транспортно-пересадочного вузла належать наступні, які наведені у табл. 1.

Особливості руху в транспортно-пересадочних вузлах включають декілька типів руху, а саме: ходьба в ногу чи ні; тривалий або короткочасний; вільний чи стиснутий; безладний або поточний; нормальний або аварійний. Визначення типу комунікації дозволить призначення параметрів які відповідають потребам мало мобільних груп населення і функціональному призначенню пішохідного шляху. Типи комунікацій транспортно-пересадочного вузла наведені у табл. 2.

В процесі визначення планувальних рішень території і забезпечення якісних умов для маломобільних груп населення необхідно включати:

- вибір транспортно-пересадочних вузлів, які спроможні задовольняти вимогам усіх груп населення;

Таблиця 1

Типи елементів транспортно-пересадочного вузла

№	Елемент планувального рішення	Вимоги з врахуванням потреб мало мобільних груп населення
1	Зупинка для посадки, висадки наземного пасажирського транспорту	Забезпечення комфортних умов очікування – наявність інфраструктури для посадки та висадки у рухомий склад
2	Станція швидкісного позавуличного пасажирського транспорту	Забезпечення безперешкодного входу у розподільчу зону, доступу до оплати, комфортні умови очікування і посадки/висадки
3	Вхід/вихід з прилягаючих територій	Ширина входу/виходу повинна бути достатньою для безперешкодного доступу до території транспортно-пересадочного вузла
4	Паркувальні простори транспортно-пересадочного вузла	Спеціальні паркувальні місця, безперешкодний і безпечний рух по території стоянки
5	Громадські об'єкти	Забезпечення доступу до товарів і послуг

Типи лінійних комунікацій транспортно-пересадочного вузла

№	Тип пішохідної комунікації	Опис	Вимоги з врахуванням потреб маломобільних груп населення
1	Направлена транзитна комунікація	Ходьба в ногу, короткочасна, стиснута, поточна, нормальний прямолінійний рух між основними транспортними елементами транспортно-пересадочного вузла	Переважає горизонтальний з мінімальною присутністю вертикального руху, психоемоційний стан підвищеної активності або активний
2	Пішохідна громадська комунікація	Ходьба в ногу, тривала, вільна, поточна, нормальний масовий прямолінійний рух з прилеглих територій до основних транспортних елементів транспортно-пересадочного вузла	Рух горизонтальний з елементами вертикального; психоемоційний стан активний або спокійний
3	Пішохідні комунікації, які виконують функцію громадських просторів	Ходьба не погоджена, тривала, вільна, безладна, нормальний рух по комунікаціям, які виконують роль громадських просторів, підходів до громадських об'єктів	Рух горизонтальний, вертикальний, психоемоційний стан комфортний або спокійний

– враховувати склад пішохідного потоку з вимогами маломобільних груп населення;
 – приймати до уваги антропометричні габарити маломобільних груп громадян;
 – визначити напрями найбільш затребувані для відвідування маломобільними групами населення [5, 6, 11-13].

Для вирішення поставлених задач необхідно використання комплексного підходу до визначення планувальних параметрів структурних елементів транспортно-пересадочного вузла.

Основними принципами розробки планувальних рішень транспортно-пересадочного вузла з врахуванням потреб маломобільних груп населення необхідно визначити:

- вивчити ситуацію використання простору транспортно-пересадочного вузла маломобільними групами населення;
- визначити передумови розвитку транспортно-пересадочного вузла і інтенсивність руху громадян;

– визначити структуру пішохідного потоку маломобільних груп населення для планування обсягу заходів по забезпеченню потреб кожної з груп;

– встановити якість існуючих пішохідних комунікацій і вузлових елементів для забезпечення доступу маломобільних груп населення до послуг транспортно-пересадочних вузлів їх комфортність і безпеку умов руху [1, 5, 11, 14, 15].

Висновки. Існуючі напрямки розвитку міст передбачають рівноправність всіх груп громадян і можливості забезпечення доступу до міських об'єктів і послуг, що створює передумови для формування інклюзивного середовища громадських просторів.

Транспортно-пересадочні вузли є не тільки центром надання транспортних послуг для населення, а також і місцем концентрації громадського життя у районах.

Для досягнення покращення умов при переміщеннях по транспортно-пересадочному вузлу за умов реконструкції необхідним є дотримання всіх вимог згідно діючих нормативних документів.

Список літератури:

1. Чаркіна Т.Ю., Задоя В.О., Юрчик О.А. Сучасний стан та перспективи розвитку відновлення і розбудови інфраструктури в Україні. Агросвіт. 2024. № 6. С. 103–112.
2. Ломотько Д.В., Філіпський О.В., Кравченко Д.М. Удосконалення роботи транспортно-пересадочних вузлів під час мультимодальних пасажирських перевезень за участю залізниць та автотранспорту. Наукові праці ВНТУ. 2019. № 4. С. 68–76.
3. Васильєва Н.В., Приліпко С.М. Доступність інфраструктури громадського транспорту для маломобільних груп населення: зарубіжного досвіду. ж. Державне управління: удосконалення та розвиток. 2020. № 11. С. 28–35.
4. Івасенко В.В. Аналіз основних нормативних вимог до засобів інформаційного забезпечення вулично-дорожньої мережі доступної для маломобільних груп населення. 2014. Міжвуз. Зб. «Наукові нотатки». Луцьк. 2014. С. 213–220.

5. Щурова В.А. Роль мережі транспортно-пересадочних вузлів у функціонально-планувальній структурі міста. *Містобудівельне та територіальне планування*. 2012. Вип.13. С. 248–255.
6. Постніков В.С. Сучасні проблеми та перспективи розвитку систем міського транспорту. *Економічний аналіз*. 2018. Т.28. № 2. С. 64–70.
7. Івасенко В.В. Класифікація елементів безбар'єрного простору вулично-дорожньої мережі та вимоги до них. *Зб.наук.праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво*. Пол. НТУ. 2013. Вип.4(39). Т.2. С. 66–73.
8. Litman T., Burwell D. Issues in sustainable transportation. *Int. Global Environmental Issues*. 2006. vol. 16. N 4. P. 331–347.
9. Рейцен Є.О., Томкевич К.О. Міські транспортно-пересадочні вузли і логістика. *Містобудування та територіальне планування*. 2004. № 17. С. 276–291.
10. Черних Г.А. Проблема соціальної адаптації людей з інвалідністю й інших мало мобільних груп населення в Україні в контексті сучасної соціології соціальної інклюзії. *Габітус*. 2024. Вип. 59. С. 30–35.
11. Kiers M., Sovec T. Way: Indoor navigation for visual impaired and blind people. *Real Corp 2010: Cities for everyone. Leveble, Healthy, Prosperous (Vienna, 18-20.05.2010)*. 2010. P. 1353–1358.
12. Тимохін В.О., Гарбар М.В., Щурова В.А. Концептуальність і раціональність в організації підземних просторів транспортно-пересадочних вузлів. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ : КНУБА. 2023. Вип. 67. С. 382–393.
13. Steinert W. Mobility planning and good solutions in the field of barrier-free access for people with disabilities in Dresden-barrier-free city all. *POLIS : conference (Dresden, 25-26.11.2010)*. 2010. P. 1–38.
14. Stjernborg V. Accessibility for All in Public Transport and the Overlooked (Social) Dimension-A Case study of Stockholm. *Sustainability*. 2019. Vol. 11(8). P. 1–16.
15. Hernandez S., Monson A. Key factors for defining an efficient urban transport interchange: Users perceptions. *Cities*. 2016. T.50. P. 158–167.

Fomenko H.R. ACCESSIBILITY OF TRANSPORT AND TRANSFER HUBS FOR PEOPLE WITH REDUCED MOBILITY

One of the current trends in settlement development is the creation of cities that are comfortable to live in. People interact in public spaces, and the level of their development gives an idea of the quality of urban space. An essential component is the creation of a comfortable, safe, and accessible environment that is geared toward meeting the needs of all population groups. Particular attention should be paid to the most vulnerable groups, which include people with limited mobility. Accessibility for these groups of citizens to urban facilities is significantly hampered by the insufficient development of related infrastructure. Unfortunately, since the start of the full-scale war in Ukraine, the number of people with disabilities has been steadily increasing. At the beginning of 2022, there were 2.7 million people with disabilities, but according to WHO data, by mid-2025, the number of people with disabilities had grown to 3.4 million. These figures are constantly changing and increasing. The issue of improving infrastructure in cities with transport hubs is particularly important. The main conditions for the effective functioning of a transport hub are the ability to ensure the transfer of passengers using public and private transport with maximum comfort and minimum time expenditure. Maximum passenger comfort can be achieved by using spatial and functional connections between all the main elements of the transport interchange hub within a single complex. Creating a universal environment means making it equally convenient for all categories of citizens, as well as giving priority to the needs of people with reduced mobility. In global practice, the formation of public spaces based on the principle of a «universal» environment is a universally recognized indicator of the quality of urban space, capable not only of effectively performing its function but also of bringing together people with different physical abilities and creating a full social life for them. Current trends in urban development envisage equality for all groups of citizens and the possibility of ensuring access to urban facilities and services, which creates the conditions for the formation of an inclusive environment in public spaces.

Key words: urban territory, infrastructure, transport hubs, pedestrian flows, people with reduced mobility, urban development.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 15.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Царенко А.О.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Тягній В.Г.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Яніцький А.А.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Козловська Т.Ф.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Олійник Л.Л.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

РОЛЬ АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ: РИЗИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Стаття присвячена аналізу ролі авіаційної наземної техніки у забезпеченні безпеки польотів, дослідженню основних ризиків, що супроводжують її експлуатацію, та визначенню перспектив модернізації у контексті підвищення ефективності та надійності авіаційних операцій.

У статті обґрунтовано, що обладнання наземної підтримки (Ground Support Equipment, GSE) є критично важливим елементом функціонування сучасної авіаційної інфраструктури, оскільки забезпечує життєвий цикл технічного обслуговування повітряних суден, включаючи енергопостачання, буксирування, навантажувально-розвантажувальні процеси, технічний огляд та підготовку до польоту. Підкреслено, що ефективність роботи GSE безпосередньо впливає на рівень безпеки польотів, оскільки більшість інцидентів, пов'язаних із пошкодженням літаків на землі, відбуваються саме внаслідок порушень у функціонуванні наземного обладнання або помилок персоналу.

Також, у даному дослідженні систематизовано основні групи ризиків експлуатації GSE, серед яких виокремлено технічні (зношення, старіння обладнання), організаційні (недотримання процедур, низький рівень підготовки персоналу), операційні (затримки рейсів, неузгодженість дій різних служб), екологічні (високі викиди та шум), а також технологічні ризики, що виникають при цифровізації та автоматизації процесів. Зазначено, що впровадження автономних систем управління, електрифікації та інтелектуального моніторингу відкриває значні можливості для мінімізації людського фактора, підвищення енергоефективності та покращення загальної операційної стабільності.

Показано, що перспективи модернізації GSE полягають у комплексній трансформації технічних, організаційних і культурних компонентів системи безпеки. Важливим чинником підвищення рівня безпеки є створення інтегрованої системи управління ризиками, що поєднує технічне оновлення обладнання, цифрові платформи моніторингу, аналітику в реальному часі та підвищення кваліфікації персоналу.

Наголошується, що ефективне впровадження автоматизованих і електричних засобів обслуговування має супроводжуватися належними заходами з кібербезпеки та навчанням персоналу. Визначено, що системний підхід до модернізації GSE є ключем до сталого розвитку авіаційної інфраструктури та запорукою підвищення безпеки польотів у глобальному масштабі.

Ключові слова: авіаційна наземна техніка, безпека польотів, модернізація, автоматизація, цифровізація, управління ризиками, електрифікація, авіаційна інфраструктура.

Постановка проблеми. Сучасна авіаційна галузь характеризується постійним зростанням кількості рейсів, зростанням вимог до оперативної ефективності та безпеки, а також загостренням конкуренції та економічного тиску на авіаперевізників і наземні служби. У цьому контексті ефективна організація наземного обслуговування літаків стає критичною складовою забезпечення безпеки польотів. Особливу увагу заслуговує обладнання наземної підтримки – ground support equipment (GSE), – яке забезпечує всі види наземних операцій з літаком: підведення живлення, запуск двигунів, буксирування, навантаження або розвантаження багажу і вантажу, обслуговування пасажирів, технічне обслуговування тощо. Без належної організації та контролю роботи такого обладнання можуть виникати затримки, аварії або пошкодження літаків, ризики травмування персоналу чи пасажирів, а також негативні фінансові наслідки для операторів.

Виходячи з цього, дослідження ролі наземної техніки в забезпеченні безпеки польотів, виявлення ризиків, які супроводжують її експлуатацію, та оцінка перспектив модернізації є актуальною науковою задачею сьогодення. Оскільки, в цілому обладнання наземної підтримки підвищує експлуатаційну ефективність та безпеку, полегшуючи процеси обробки літаків, моніторинг рухів та зменшує присутність людської помилки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі проведеного огляду наукових праць по тематиці статті, виокремимо кілька ключових напрямів досліджень та розглянемо їх детальніше. Перш за все дослідники показали, що стан і використання наземного обладнання безпосередньо корелюють із ризиками виникнення пошкоджень літаків або наземних інцидентів: за даними Міжнародної асоціації повітряного транспорту (IATA) у базі IDX за останні роки зафіксовано понад 5800 випадків пошкоджень літаків саме унаслідок роботи GSE.

Окрім цього, виконане емпіричне дослідження на кількох аеропортах вказує, що GSE-обладнання може бути значним чинником затримок рейсів, що опосередковано впливає і на безпеку: в дослідженні Н. Tucci та F. Facchini («*Ground support equipment and flight delays: a multivariate analysis in different locations*», 2025) встановлено, що обладнання GSE може істотно збільшувати затримки рейсів і кожен аеропорт має свої характерні особливості у цьому сенсі. Також, публікації останніх років звертають увагу на відповідність процедурам персоналу, що

обслуговує GSE. Наприклад, дослідження з Індонезії показало, що рівень дотримання працівниками GSE стандартних процедур (SOP) ще нижчий, ніж очікується, і корелює з рівнем безпеки польотів (коефіцієнт кореляції 0,9) [1].

Якщо розглядати галузеві звіти, то вони містять аналіз ризиків, пов'язаних із старінням обладнання, відсутністю регулярного техобслуговування, недостатньою цифровізацією та автоматизацією – наприклад, у звіті Civil Aviation Safety Authority (CASA, Австралія) зазначається, що GSE, які використовуються довгий час і не проходять адекватного технічного контролю, можуть призвести до травм персоналу або пошкоджень літаків.

Тенденції модернізації останніх років, включно із впровадженням електричного GSE (eGSE), автономних транспортних засобів, систем підключення і моніторингу в реальному часі – наведені у галузевих статтях та аналітиці («*Recent Innovations in Ground Support Equipment*», «*Green Solutions for Ground Support Equipment at Airports*»). Зокрема, електрифікація GSE розглядається як один із ключових напрямів модернізації [2, 3].

При цьому, можна констатувати недостатню системну інтеграцію цифрових технологій у GSE з точки зору безпеки польотів, недостатнього аналізу людського фактора у наземних операціях, а також відсутність узагальнених моделей ризиків, пов'язаних із наземною підтримкою.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження авіаційної наземної техніки у контексті забезпечення безпеки польотів, виявлення основних ризиків, пов'язаних з її експлуатацією, та оцінка перспектив її модернізації.

Виклад основного матеріалу. Наземне обслуговування літаків перед вильотом, після приземлення або під час технічного простою передбачає комплекс операцій, що виконуються за допомогою обладнання наземної підтримки [4]. До цього обладнання належать наземні енергоблоки живлення (Ground Power Units, GPU), буксирні трактори, вантажні підйомники та конвеєри, пасажирські сходи, системи кондиціонування або обігріву повітря, технічні установки, а також пристрої для обслуговування багажу та вантажу. Обладнання наземної підтримки є невід'ємним елементом авіаційної інфраструктури, оскільки забезпечує ефективність експлуатаційних процесів, підвищує безпеку та мінімізує ймовірність людських помилок під час підготовки повітряного судна до польоту.

У контексті безпеки польотів функції GSE мають ключове значення. У зв'язку з тим що, системи електроживлення, кондиціонування та запуску двигунів дозволяють виконувати технічні операції без використання бортових джерел енергії, що зменшує ризик збоїв у роботі обладнання та продовжує термін його служби [5]. Буксирування та відчеплення літаків із позицій стоянки або ангара вимагає високої точності, оскільки будь-яке відхилення може призвести до пошкодження літака чи травмування персоналу. Операції з обслуговування багажу, вантажу та пасажирів також потребують бездоганної координації між технічними засобами та персоналом. Надійність підйомників, конвеєрів і пасажирських сходів безпосередньо впливає на дотримання часових та безпечових стандартів, загальну якість наземного обслуговування.

Окрім того, ефективна система моніторингу руху наземного обладнання, чітке управління потоками транспорту і взаємодія між екіпажами, диспетчерами та технічною службою є запорукою уникнення зіткнень, інцидентів і порушень у структурі авіаційних операцій. Отже, GSE є критично важливою ланкою у забезпеченні безпеки польотів, адже навіть найсучасніше повітряне судно може бути піддане ризику через неналежне наземне обслуговування.

Разом із тим експлуатація наземного обладнання супроводжується низкою ризиків, які прямо або опосередковано впливають на безпеку авіаційних операцій. Одним із основних ризиків є фізичне зношення, старіння техніки та відсутність належного технічного обслуговування. Застаріле обладнання, яке використовується понад встановлені терміни, може стати джерелом аварійних ситуацій або пошкодити літак. Не менш значущим чинником є людський фактор – порушення процедур, недостатня підготовка персоналу та нехтування стандартами експлуатації. Типовими проблемами залишаються неправильне розташування обладнання біля літака, відсутність сигнальних маячків тощо. Такі порушення істотно підвищують ймовірність інцидентів і збільшують ризик людської помилки [6].

Окрім того, небезпеку становить недостатня координація руху наземного транспорту, затори на території аеродрому, низька видимість та несприятливі погодні умови. Такі фактори можуть призвести до зіткнень між обладнанням і літаками, затримок або пошкоджень. Операційні затримки, спричинені неефективною роботою GSE, негативно впливають на ритм польотів і створюють

стресові ситуації серед персоналу, що опосередковано знижує рівень безпеки. Екологічні та енергетичні ризики також залишаються актуальними: значна частина наземної техніки досі працює на двигунах внутрішнього згоряння, що підвищує рівень шуму, викидів і погіршує умови праці. Це, своєю чергою, негативно позначається на здоров'ї працівників і створює додаткові бар'єри для інвестицій у модернізацію.

З появою цифрових і автоматизованих систем обслуговування виникають нові ризики, пов'язані з кібербезпекою, помилками в програмному забезпеченні, несправністю сенсорів або несумісністю обладнання. При переході до «розумних» систем управління важливо враховувати рівень підготовки персоналу, адже недостатня компетентність у роботі з цифровими системами може звести нанівець потенційні переваги автоматизації.

Інтеграційні ризики між обладнаннями різних виробників і службами також залишаються проблемою, особливо коли операції здійснюються кількома підрядниками. Некоректна взаємодія людей, процесів і технічних засобів часто стає причиною пошкоджень літаків і затримок рейсів. Систематизуємо та узагальнимо основні ризики і їх характеристики у вигляді табл. 1.

Перспективи модернізації наземного обладнання визначаються потребою підвищення безпеки, ефективності та екологічності авіаційних процесів. Одним із провідних напрямів є автоматизація – впровадження автономних або напів-автономних транспортних засобів, підйомників і роботизованих систем, що знижують залежність від людського фактора. Цифровізація та впровадження систем моніторингу в реальному часі дають змогу відстежувати технічний стан, розташування і рівень завантаження GSE, своєчасно виявляти несправності та прогнозувати технічне обслуговування. Аналіз даних у поєднанні з інтелектуальними системами управління сприяє прийняттю рішень на основі доказової інформації, що зменшує ризики збоїв і підвищує ефективність операцій.

Важливим напрямом є електрифікація обладнання, що дозволяє скоротити експлуатаційні витрати, зменшити рівень шуму та викидів, а також підвищити надійність техніки. Використання електричних або гібридних систем сприяє сталому розвитку авіаційної галузі, однак потребує оновлення інфраструктури – створення станцій зарядки, модернізації електромереж і підготовки технічного персоналу. Паралельно актуальним залишається управління життєвим

Основні ризики експлуатації наземної техніки (GSE) та їхні характеристики

№	Тип ризику	Коротка характеристика	Потенційний вплив на безпеку польотів
1	Зношення/старіння обладнання	Технічне обладнання використовують тривалий час без оновлення або заміни.	Підвищення ймовірності несправностей, травм, пошкодження літака.
2	Недотримання процедур/людський фактор	Персонал не виконує SOP, недостатня підготовка.	Помилки в наземному обслуговуванні, затримки, інциденти.
3	Некоординована наземна діяльність	Конфлікти руху GSE, низька видимість.	Зіткнення, пошкодження літака, затримки.
4	Операційні затримки	GSE не готове або неефективне в обслуговуванні.	Стрес для персоналу, накопичення ризиків, зниження якості.
5	Екологічні/енергетичні фактори	Використання застарілих двигунів, шум, викиди.	Низька економічна ефективність, зниження уваги до безпеки.
6	Цифрові/технологічні ризики	Автоматизація, підключені системи з кіберризиками.	Збої, неправильної роботи обладнання, порушення безпеки.
7	Інтеграційні ризики процесів	Багато субпідрядників, слабка взаємодія.	Погана координація, помилки, інциденти.

циклом обладнання: заміна старих агрегатів, утилізація відпрацьованих компонентів і дотримання регламентів обслуговування.

Не менш важливим аспектом модернізації є підвищення кваліфікації персоналу та формування культури безпеки. Впровадження міжнародних стандартів і сертифікаційних програм сприяє підвищенню професійного рівня працівників, зміцненню дисципліни та зниженню ймовірності помилок. Таким чином, модернізація наземного обладнання – це не лише технічне оновлення, а комплексна трансформація управлінських, організаційних і культурних процесів.

Водночас модернізація супроводжується власними ризиками, зокрема під час інтеграції нових систем у вже існуючі інфраструктури. Упровадження автономних або електричних GSE потребує комплексного підходу до кіберзахисту, безпеки даних, сумісності з наявним обладнанням і адаптації процедур технічного обслуговування. Неналежне врахування цих аспектів може створити нові вразливості, що негативно позначатимуться на загальній безпеці польотів.

Отже, ефективна система управління наземним обладнанням в авіації повинна поєднувати технічну модернізацію, цифровізацію процесів, підвищення кваліфікації персоналу та впровадження культури безпеки. Лише системний підхід, який охоплює всі рівні – від технологічного до організаційного, – може забезпечити стале підвищення рівня безпеки польотів і знизити ризики, пов'язані з експлуатацією наземної техніки.

Висновки. У статті показано, що обладнання наземної підтримки відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки польотів. Воно виступає ключовим зв'язком між технічним обслуговуванням літака, підготовкою до польоту та операційною ефективністю. У той же час робота з наземною технікою супроводжується низкою значних ризиків: зношення обладнання, недотримання процедур, недостатня підготовка персоналу, екологічні фактори та технологічні виклики. Аналіз останніх досліджень показав, що саме ці аспекти активно досліджуються, але залишаються прогалини, особливо в інтеграції цифрових технологій у наземне обслуговування та усеохопній моделі ризиків.

Перспективи модернізації GSE – автоматизація, цифровізація, електрифікація, управління життєвим циклом – відкривають значні можливості підвищення рівня безпеки, зниження людських помилок, підвищення оперативності та ефективності наземних операцій. Однак вони потребують комплексного підходу: модернізація обладнання має супроводжуватись переглядом процесів, підготовкою персоналу, стандартами кібербезпеки, та чітким управлінням ризиками. З огляду на це, для авіаційних операторів та служб наземного обслуговування є важливим планування інвестицій у GSE з орієнтацією на безпеку, ефективність і стійкість.

Для розвитку української авіації і наземної служби, зокрема, актуальним є врахування цих тенденцій: адаптація до міжнародних стандартів (наприклад, участь у програмах, подібних до IATA Enhanced GSE Recognition Program), модернізація обладнання, покращення підготовки персоналу, впровадження систем цифрового моніторингу. У цілому, ефективна модернізація наземної техніки може стати значущим важелем підвищення безпеки польотів та конкурентоспроможності операторів.

Список літератури:

1. Dena Piscarini A., Suryono W., Iswahyudi P. The analysis of compliance of ground support equipment (GSE) personnel to flight safety. *Proceeding of International Conference of Advanced Transportation, Engineering, and Applied Social Science*. 2023. Vol. 2(1). Pp. 161–167. <https://doi.org/10.46491/icateas.v2i1.1643>
2. Tabares D. A., Mora-Camino F. Aircraft ground operations: steps towards automation. *CEAS Aeronautical Journal*. 2019. Vol. 10(3). Pp. 965–974. <https://doi.org/10.1007/S13272-019-00390-5>
3. Subandi S., Wahyuningsih S. *Kinerja Operator Ground Support Equipment (GSE) Dalam Menjaga Keamanan Dan Keselamatan Penerbangan Di Bandar Udara Sultan Muhammad Salahuddin Bima*. 2025. Vol. 1(2). Pp. 20–26. <https://doi.org/10.56606/jmmu.v1i2.248>
4. Utama Z. I., Kalbuana N., Faizal I. Kajian digitalisasi pendataan ground support equipment (gse) guna mempermudah pengawasan unit amc di bandar udara internasional juanda surabaya. *Journal Of Social And Economics Research*. 2025. Vol. 7(1). Pp. 1337–1346. <https://doi.org/10.54783/jsr.v7i1.963>
5. Wang S., Che Y., Zhao H., Lim A. Accurate Tracking, Collision Detection, and Optimal Scheduling of Airport Ground Support Equipment. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8(1). Pp. 572–584. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3004874>
6. Linka A., Wróblewska A. Increasing safety level of airport ground operations by implementing an autonomous system of supervision and security. *Transportation Overview – Przegląd Komunikacyjny*. 2018. 9. Pp. 8–14. https://doi.org/10.35117/A_ENG_18_09_02

Tsarenko A.O., Tiahnii V.G., Yanitskyi A.A., Kozlovska T.F., Oliinyk L.L. THE ROLE OF AVIATION GROUND EQUIPMENT IN ENSURING FLIGHT SAFETY: RISKS AND PROSPECTS OF MODERNIZATION

The article is devoted to the analysis of the role of aviation ground equipment in ensuring flight safety, the study of the main risks accompanying its operation, and the identification of modernization prospects in the context of increasing the efficiency and reliability of aviation operations.

The article substantiates that ground support equipment (GSE) is a critically important element of the functioning of modern aviation infrastructure, as it ensures the life cycle of aircraft maintenance, including power supply, towing, loading and unloading processes, technical inspection and preparation for flight. It is emphasized that the efficiency of GSE operation directly affects the level of flight safety, since most incidents associated with damage to aircraft on the ground occur precisely as a result of malfunctions in the functioning of ground equipment or personnel errors.

Also, this study systematizes the main groups of risks of GSE operation, including technical (wear and tear, equipment aging), organizational (non-compliance with procedures, low level of personnel training), operational (flight delays, incoordination of actions of various services), environmental (high emissions and noise), as well as technological risks arising from digitalization and automation of processes. It is noted that the implementation of autonomous control systems, electrification and intelligent monitoring opens up significant opportunities for minimizing the human factor, increasing energy efficiency and improving overall operational stability.

It is shown that the prospects for GSE modernization lie in the comprehensive transformation of technical, organizational and cultural components of the security system. An important factor in increasing the level of security is the creation of an integrated risk management system that combines technical equipment upgrades, digital monitoring platforms, real-time analytics and staff training.

It is emphasized that the effective implementation of automated and electric maintenance tools must be accompanied by appropriate cybersecurity measures and personnel training. It is determined that a systematic approach to GSE modernization is the key to the sustainable development of aviation infrastructure and the key to improving flight safety on a global scale.

Key words: aviation ground equipment, flight safety, modernization, automation, digitalization, risk management, electrification, aviation infrastructure.

Дата надходження статті: 14.11.2025

Дата прийняття статті: 03.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Чепіль О.О.

Національний транспортний університет

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УПРАВЛІННІ, АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЇ ЕТАПІВ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ

У статті розглядаються можливості застосування штучного інтелекту (ШІ) для контролю вантажопотоків, автоматизації та систематизації транспортного процесу. Особливу увагу приділено тому, як сучасні цифрові технології поєднуються з традиційними методами управління, забезпечуючи більш точний моніторинг стану транспортних засобів, оперативне коригування маршрутів і своєчасне реагування на зміни зовнішніх умов. На основі аналізу актуальних досліджень у сфері перевезення вантажів показано, що впровадження інтелектуальних систем дозволяє суттєво підвищити ефективність логістичних операцій, знизити ризики, пов'язані з людським чинником, а також оптимізувати процеси планування, обробки даних та документообігу. Штучний інтелект створює можливості для глибшої інтеграції транспортних систем у загальнонаціональні та міжнародні логістичні мережі. Завдяки прогнозуванню попиту, аналізу заторів, оцінці стану інфраструктури та розрахунку оптимальних маршрутів вантажопотоки стають більш керованими та передбачуваними. Алгоритми машинного навчання здатні забезпечити високу точність прогнозування часу доставки, визначення потенційних затримок і пропозицію альтернативних рішень у режимі реального часу. Крім того, автоматизовані системи дозволяють стандартизувати процедури оформлення документів, зменшуючи кількість помилок та прискорюючи взаємодію між учасниками транспортного процесу. Таким чином, використання ШІ відкриває нові перспективи для модернізації транспортно-логістичної галузі, зміцнюючи її стійкість, продуктивність і конкурентоспроможність у сучасних умовах глобалізації.

Ключові слова: штучний інтелект, транспортний процес, автоматизація, стандартизація, оптимізація перевезень, логістика.

Постановка проблеми. З розвитком глобальної логістики та посиленням вимог до швидкості, безпеки та стійкості перевезень, транспортні системи стикаються з необхідністю застосування нових технологій. Штучний інтелект стає одним із найважливіших інструментів у цій сфері. Він дозволяє автоматизувати моніторинг, планування і управління процесами, які раніше виконувалися вручну або із невеликою підтримкою цифрових систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні аспекти використання штучного інтелекту на транспорті досліджуються в різних країнах з 2019 року. Русул Абдулджаббал представив огляд застосування ШІ до різних проблемних ділянок на транспорті [1, с. 9]; Едвардас Ляховичюс аналізує методи прогнозування попиту та тарифів на перевезення вантажів у контексті автомобільної вантажної компанії [2, с. 240]; Мартін ДюПлессі досліджує потенційну цінність і вплив використання ШІ для вантажних перевезень, визначає різні сценарії використання [3, с. 8].

Постановка завдання. Метою статті є проаналізувати ключові напрями використання штучного інтелекту на етапах транспортного процесу: контролю, автоматизації та стандартизації.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення мети застосовано методологію аналізу наукової літератури та синтезу сучасних досліджень у сфері ШІ та логістики. Наприклад, Барбара Феррейра та Жоау Рейс виконали системний огляд впровадження автоматизації в логістиці, вказуючи, що основою автоматизації є технології ШІ, машинне й глибинне навчання. Впровадження розумної логістики через автоматизацію має потенціал підвищити конкурентоспроможність і мінімізувати похибки. Вплив штучного інтелекту та роботизованої логістики на автоматизацію в логістиці є глибокими. Завдяки спільним зусиллям у сфері інтеграції людини та робота з'являється можливість розробити соціальних роботів, які гармонійно співіснують з людьми. Ця інтеграція може привести до революційної трансформації логі-

тичних операцій [5, с. 16]. Проблеми з транспортом стають проблемою, коли поведінка системи та користувачів надто складна для моделювання та прогнозування маршрутів руху. Тому ІІІ вважається хорошим вибором для транспортних систем, щоб подолати виклики зростаючого попиту на подорожі, шкідливі викиди в атмосферу, питання безпеки та деградації навколишнього середовища. Ці виклики виникають через стабільне зростання сільського та міського трафіку через збільшення населення [1, с. 11]. Ріст населення, відповідно інтенсивності руху, а також підвищені вимоги до екологічності та безпеки створюють ситуацію, коли людські можливості опрацювання даних перестають бути достатніми. У цьому контексті штучний інтелект постає не просто як інструмент автоматизації, а як невід'ємний компонент майбутнього транспортної інфраструктури.

Щоб використання ІІІ було максимально ефективним та точним необхідно на вході в систему використовувати максимально точні дані. Використання даних низької якості приводять до того, що ІІІ помиляється. Менеджери ланцюгів постачання вантажів повинні володіти аналітичними навичками. Машинне навчання може бути контрольованим, неконтрольованим та підкріплене навчанням. Аргументи на користь ІІІ в сталому управлінні ланцюгами постачання здебільшого ґрунтуються на підвищенні ефективності усіх процесів [4, с. 55].

Низькоякісні, неповні або застарілі дані створюють ефект «сміття на вході – сміття на виході», що може не лише знизити точність прогнозів, а й спричинити стратегічні помилки у плануванні логістики. Звідси – зростаюча роль фахівців, які повинні володіти не просто технічними навичками, а й аналітичним мисленням, здатністю розуміти природу даних і правильно інтерпретувати їхній вплив на систему. Алгоритми штучного інтелекту – машинне навчання, нейронні мережі – застосовуються для планування маршрутів з урахуванням трафіку, погоди, завантаженості, витрат. Машинне навчання використовується у секторі вантажних перевезень для прогнозування. Прогнозування вартості: споживання пального, очікуваний час прибуття транспортних засобів, пропускну здатність вантажних терміналів та ін. Прогнозування міжнародних вантажних мереж [6, с. 18]. Багато транспортних проблем приводять до задачі оптимізації, яка потребує індивідуальних алгоритмів для полегшення розв'язання обчислювальної аналітики. Це високотехнологічні обчислювальні алгоритми, відомі як растрові алго-

ритми. Генетичний алгоритм є прикладом таких алгоритмів. Він базується на еволюції біологічної концепції. Він розв'язує складні задачі оптимізації на основі концепції «виживання придатності» і є хорошим інструментом для використання в мережі міського планування, моделювання. Ще один алгоритм «колонія мурах», алгоритм штучного інтелекту побудований на основі поведінки групи справжніх мурах, які сліднують своїм шляхом від мурашника до джерела їжі. Штучна імунна система, що моделюється на основі імунної системи людини. Всі вище перераховані алгоритми підходять для прогнозування мислення та адаптивності. Тому вони використовуються для розв'язання задач оптимізації, які пов'язані з динамічними ситуаціями трафіку. Агентно-орієнтована програмна інженерія дозволяє використовувати динамічний підхід до визначення найкоротшого шляху через формування багатьох критеріїв та багатьох сценаріїв [1, с. 5]. Їхня сила – у можливості швидко перебирати різні сценарії та синтезувати рішення, які є недосяжними для стандартних математичних підходів у реальному часі. Впровадження агентно-орієнтованих систем відкриває шлях до моделювання транспортних систем як множини взаємодіючих автономних агентів – транспортних засобів, пішоходів, операторів логістики, інфраструктурних елементів. Такий підхід дозволяє виявляти закономірності поведінки та прогнозувати розвиток ситуацій, які неможливо описати лінійними моделями.

Застосування алгоритмів машинного навчання – як контрольованих, так і неконтрольованих, а також методів навчання з підкріпленням – дозволяє створювати адаптивні моделі, здатні прогнозувати вартість операцій, споживання ресурсів, час прибуття транспортних засобів та пропускну здатність логістичних вузлів. Такі алгоритми фактично надають можливість формувати «прогнозовані логістичні мережі», які постійно підлаштовуються під зовнішні умови та внутрішні змінні процесів.

Мартін ДюПлессі в своїй статті визначив, що велика кількість досліджень ІІІ зосереджувалася на орієнтовному часу доставки, прогнозування затримок, безпеці водіїв, стану водіїв та інших операторів обладнання, ефективності транспортних засобів, розпізнавання та класифікація суден, оцінка тарифів, різні режими перевезення, маршрутизація та розклад руху [3, с. 3]. Дослідження показали, що у сфері логістики дослідження ІІІ мають ізольований характер. Велика кількість рецензованих наукових досліджень оцінювала

або досліджувала певний кейс використання або застосування ІІІ у вантажних перевезеннях. Отже, дослідження даної теми є актуальним та необхідним для ринку транспортних послуг.

Стандартизація процесів та автоматизація документообігу. Використання цифрових платформ, інтеграція ІІІ дозволяє стандартизувати документи, процеси прийому/відправки, оформлення вантажу, зменшити людський фактор і помилки. Важлива інтеграція ІІІ для підвищення точності, продуктивності й конкурентоспроможності [4, с.59]. Застосування ІІІ веде до зменшення витрат, підвищення продуктивності, скорочення часу доставки, підвищення якості обслуговування.

ІІІ відіграє важливу роль у підвищенні та формуванні довіри до роботизованих систем, що використовує транспортна галузь. Традиційно роботи сприймалися як продукт механічної або електротехнічної інженерії, застосовуючи підхід знизу вгору. Однією з сфер, де ІІІ та технології покращили внутрішню логістику, є зменшення помилок під час вибору товарів в складських терміналах. Використання технології радіочастотної ідентифікації довело свою ефективність. RFID- чіпи відомі, як інтегровані схеми, зберігають ідентифікатори, що дозволяє легко знаходити та відстежувати автономних роботів. DHL використовують застосовують камери для зйомки зображень або відео та алгоритми штучного інтелекту для аналізу даних із цифрових зображень. Ці системи можуть розрізняти предмети і навіть самостійно слідкувати за об'єктами. Поєднуючи сильні сторони робототехніки та ІІІ, ми можемо підвищувати ефективність, надійність і безпеку роботизованих систем [5, с. 75]. Оскільки кількість людей на підприємствах, що використовують роботів та ІІІ є високою, непередбачуваність, порушення, непорозуміння є складовою системи.

Застосування RFID-технологій і комп'ютерного зору в логістиці – яскравий приклад того, як ІІІ підсилює надійність і точність операцій. Автоматизовані складські комплекси, де роботи здатні безпомилково ідентифікувати товари, визначати їхнє місцезнаходження та відстежувати рух, значно зменшують кількість людських помилок. Особливо показовим є кейс DHL: використання камер та алгоритмів аналізу зображень дозволяє системам розрізняти об'єкти, прогнозувати їхню траєкторію та забезпечувати синхронізовану роботу різних роботизованих модулів. Водночас важливо підкреслити, що зі зростанням кількості взаємодій між людьми, ІІІ та роботами неминуче зростає і рівень непередбачуваності. Людський фак-

тор нікуди не зникає: неправильне трактування сигналів системи, порушення протоколів безпеки чи непорозуміння між операторами та автономними платформами можуть спричинити збої. Це означає, що окрім технічних аспектів, ключову роль відіграє дизайн взаємодії людина – робот та загальний рівень цифрової культури на підприємстві. Розвиток ІІІ не лише покращує ефективність внутрішньої логістики, але й поступово змінює структуру довіри у взаємодії «людина – машина». Довіра вже не базується лише на механічній надійності, а формується через здатність системи пояснювати свої рішення, прогнозувати ризики та працювати прозоро. Саме тому майбутнє роботизованих систем у транспортній сфері залежить не тільки від технологій, а й від того, наскільки успішно підприємства зможуть інтегрувати ці технології у реальні робочі процеси, мінімізуючи бар'єри для людей та підсилюючи їхню впевненість у роботі з ІІІ.

Інтеграція ІІІ-систем у наявні логістичні процеси часто потребує значних змін в організації й інфраструктурі. Високі початкові інвестиції, потреба в кваліфікованих фахівцях. Етичні, правові, безпекові аспекти застосування ІІІ – конфіденційність даних, вплив на працівників. Як відзначено в Барбара Феррейра та Жоау Рейс, хоча автоматизація має великий потенціал, вона все ще недостатньо імplementована в логістиці [5, с.77].

Отже, ІІІ є не лише засобом підвищення ефективності, а стратегічним елементом розвитку транспортної галузі. Його застосування сприяє скороченню витрат, покращенню сервісу, підвищенню екологічності та безпеки, одночасно відкриваючи можливості для створення «розумних» логістичних мереж, здатних адаптуватися до змін у режимі реального часу. Актуальність подальших досліджень у цій сфері є беззаперечною, оскільки саме інтелектуальні системи визначатимуть конкурентоспроможність транспортних компаній у найближчому майбутньому.

Висновки. У даному дослідженні визначено, що штучний інтелект відкриває значні можливості для модернізації транспортно-логістичних процесів: контролю, автоматизації, стандартизації. Використання ІІІ на етапах перевезень вантажів дозволяє оптимізувати маршрути, прогнозувати ризики, стандартизувати документообіг і підвищувати загальну ефективність. Проте для практичного впровадження необхідно подолати низку організаційних, технологічних і правових бар'єрів. Проведений аналіз доводить, що штучний інтелект стає ключовим драйвером трансформації сучасних транспортно-

логістичних систем. Його роль виходить далеко за межі автоматизації окремих операцій – III формує новий підхід до управління транспортними процесами, забезпечуючи їх адаптивність, точність і стійкість у умовах стрімкого зростання трафіку, підвищених вимог до безпеки та екологічності. Дослідження свідчать, що алгоритми машинного навчання, методи прогнозування, агентно-орієнтоване моделювання та інтелектуальні роботизовані системи дозволяють вирішувати складні задачі

оптимізації, прогнозувати затримки, планувати маршрути, оцінювати пропускну здатність логістичних вузлів і удосконалювати управління ресурсами. Використання RFID-технологій та комп'ютерного зору додатково підвищує точність і надійність внутрішньої логістики, зменшуючи ризик людських помилок. Подальші дослідження можуть фокусуватися на конкретних кейсах впровадження III у вантажних перевезеннях, впливі на екологічність і стійкість логістики.

Список літератури:

1. Abduljabbar R., Dia H., Liyanage S., Asadi Bagloee S. *Applications of artificial intelligence in transport: an overview*. - *Sustainability*. 2019. Vol. 11, Iss. 1. P. 1–11.
2. Liachovičius E., Šabanovič E., Skrickij V. *Freight rate and demand forecasting in road freight transportation using econometric and artificial intelligence methods*. *Transport*. 2023. Vol. 34, Iss. 4. P. 231–242.
3. Du Plessis M., Gerber R., Goedhals Gerber L., Van Eeden J. *Shaping the future of freight logistics: use cases of artificial intelligence – Sustainability*. – 2025. Vol. 14, Iss. 4 P. 7–32.
4. Fatorachian H. *Automation and AI in logistics: opportunities and challenges*. - *Journal of Logistics & Supply Chain Management*. 2024. Vol. 16, P. 45–60.
5. Ferreira F., Reis J. *Systematic review on artificial intelligence applications in transportation and logistics*. *Logistics*. 2023. Vol. 7, P. 70–80.
6. Barua L., Zou B., Zhou Y. *Machine learning for international freight transport management: a comprehensive review* - *Research in Transportation Business & Management*. 2020. Vol. 7, P. 5–29.

Chepil O.O. THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MANAGEMENT, AUTOMATION AND SYSTEMATIZATION OF THE STAGES OF THE TRANSPORT PROCESS

The article examines the possibilities of applying artificial intelligence (AI) for cargo flow control, automation, and systematization of the transport process. Special attention is given to how modern digital technologies are combined with traditional management methods, ensuring more accurate monitoring of vehicle conditions, operational route adjustments, and timely responses to changes in external factors. Based on the analysis of current research in the field of freight transportation, it is demonstrated that the implementation of intelligent systems significantly increases the efficiency of logistics operations, reduces risks associated with human factors, and optimizes processes of planning, data processing, and document management. Artificial intelligence creates opportunities for deeper integration of transport systems into national and international logistics networks. Through demand forecasting, traffic analysis, infrastructure condition assessment, and calculation of optimal routes, cargo flows become more manageable and predictable. Machine learning algorithms ensure high accuracy in predicting delivery times, identifying potential delays, and offering alternative solutions in real time. Moreover, automated systems enable the standardization of document processing procedures, reducing the number of errors and accelerating interaction among participants in the transport process. Thus, the use of AI opens new prospects for the modernization of the transport and logistics sector, strengthening its resilience, productivity, and competitiveness in today's conditions of globalization.

Key words: artificial intelligence, transport process, automation, standardization, transport optimization, logistics.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Чорногор Н.О.

Українська державна льотна академія

Єніна І.І.

Українська державна льотна академія

Мацуї А.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПАСАЖИРОПОТОКАМИ В АЕРОПОРТАХ

У статті досліджується та розробляється концептуальна основа для створення динамічної інтелектуальної моделі системи підтримки прийняття рішень, призначеної для ефективного управління пасажиропотоками в умовах аеропортового середовища. Дослідження визначається першочерговою необхідністю підвищення ефективності логістики аеропортів у відповідь на стрімке зростання обсягів авіаперевезень та значну нерівномірність добових і сезонних навантажень. Проаналізовано традиційні методи прогнозування, які ґрунтуються на фіксованих розкладах і статичних даних, мають обмежену гнучкість і недостатню точність в умовах динамічної невизначеності авіаційних процесів. В статті визначена неефективність таких підходів, яка призводить до перевантаження інфраструктури, формування тривалих черг у контрольних зонах, затримок рейсів та нераціонального використання ресурсів у пікові періоди. Дослідження спрямоване на розробку концепції та алгоритмічної структури інтелектуальної моделі СППР, що базується на гібридних нейро-нечітких підходах. Дана модель повинна забезпечити рівномірний розподіл пасажирських потоків, оптимізацію використання ресурсів та підвищення якості обслуговування в міжнародних аеропортах. Для вирішення цих завдань запропонована модель, яка інтегрує передові інтелектуальні технології. У статті обґрунтовується використання гібридного підходу *Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System*, який є високоефективним інструментом для обробки динамічних і невизначених даних. ANFIS поєднує можливості штучних нейронних мереж ANN до самонавчання та нелінійного розпізнавання образів із механізмами інтерпретованості та моделювання невизначеності нечіткої логіки *Fuzzy Logic*. Дана комбінація гарантує високу точність прогнозування та адаптивне регулювання управлінських правил на основі поточних даних. Розроблено цілісну алгоритмічну структуру інтелектуальної системи управління пасажиропотоками, яка охоплює всі етапи від збору та фільтрації даних (сенсори, системи реєстрації) до їх аналізу в аналітичному модулі та прогностичної обробки в модулі ANFIS. На завершальному етапі система здійснює генерацію управлінських рекомендацій у модулі СППР з застосуванням нечітких правил та алгоритмів оптимізації для прийняття рішень. Модель вирішує проблему обмеженої динамічності традиційних статистичних і аналітичних методів в умовах постійної стохастичності та невизначеності авіаційних процесів. Вхідні параметри системи включають розклад рейсів, кількість пасажирів, стан погоди, дані з турнікетів і камер, а вихідні – прогноз обсягів пасажиропотоку та рекомендації з розподілу ресурсів. Очікувані якісні результати впровадження моделі полягають в значному підвищенні точності прогнозування пасажирських потоків і скорочення часу очікування пасажирів під час пікових годин. Запропоноване рішення сприятиме раціональному використанню інфраструктури терміналу та зменшенню нештатних ситуацій, пов'язаних із перевантаженням і затримками. Як наслідок, застосування ІСУПП забезпечить стабільність функціонування аеропорту, підвищення рівня безпеки та якості сервісу, підтверджуючи доцільність подальшого розвитку моделі як головної складової цифрової трансформації аеропортової інфраструктури.

Ключові слова: інтелектуальна модель, пасажиропотоки, адаптивне управління, гібридні підходи, нейро-нечітка логіка, організація авіаційної діяльності, авіаційна транспортна інфраструктура, оператор.

Постановка проблеми. Стрімке зростання обсягів авіаційних перевезень та значна нерівномірність добових і сезонних навантажень створюють серйозні проблеми для управління інфраструктурою міжнародних аеропортів. Що призводить до перевантаження терміналів, затримок рейсів, утворення тривалих черг у контрольних зонах та нестачі ресурсів у пікові періоди. Тому ефективне управління пасажиропотоками становить одне з основних завдань, від якого безпосередньо залежать пропускна спроможність, якість обслуговування та рівень безпеки.

Традиційні методи організації потоків пасажирів базуються на фіксованих розкладах та статистичних даних минулих періодів. Проте такі підходи характеризуються обмеженою адаптивністю та точністю в динамічних умовах функціонування аеропорту, особливо за наявності невизначеності та нечітких даних.

З огляду на обмеження виникає потреба у розробці нових інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (СППР), здатних забезпечити ефективне управління пасажиропотоками в режимі реального часу. Що дасть змогу здійснювати оперативний аналіз поточної ситуації, прогнозувати можливі перевантаження та формувати оптимальні стратегії організації пасажирських потоків. Застосування систем сприятиме узгодженості процесів, стабільності функціонування аеропорту і підвищенню якості сервісу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Управління пасажиропотоками є багатоаспектною задачею, що вимагає застосування різноманітних математичних та інтелектуальних методів. Класичні основи інтелектуальних систем та гібридних підходів детально розглянуто у роботах [1, 2]. Сучасний огляд штучного інтелекту охоплюючий СППР та машинне навчання (ML), описано у роботі Расела і Норвінга [2].

Деякі автори займалися дослідженнями з управління пасажиропотоками та аеропортової логістики займалися [3, 4, 5]. Так автори [3] демонструють ефективність імітаційного моделювання Monte Carlo simulation для аналізу руху пасажирів. В статті [4] розглядаються прогнозування обсягів пасажиропотоку з використанням статистичного аналізу моделі ARIMA. Загальний огляд СППР для оперативного управління аеропортовими операціями надано у дослідженні [5].

В роботі [6] автори демонструють успішне прогнозування обсягу авіаційних перевезень із використанням нейронних мереж. Робота Зої

і Хансена [7] показує високу точність штучних нейронних мереж (ANN) для прогнозування затримок. Практичне застосування гібридних підходів підтверджує дослідження [8] по використанню моделі ANFIS-GA для прогнозування транспортних потоків. В роботі [9] автори підкреслюють зростаюче значення інтелектуальних систем у термінальних операціях.

Актуальність розробки цілісної структури СППР обґрунтовані в [10], де розглядається архітектура та функціональність інтелектуальних систем управління аеропортовою діяльністю. Особливої уваги заслуговують дослідження, сфокусовані на проблемі невизначеності для авіаційних процесів. Так, у роботі [11] автори безпосередньо розглядають моделювання пасажиропотоків у транспортних вузлах з урахуванням невизначеності, підкреслюючи необхідність використання гнучких інструментів.

Аналіз публікацій свідчить, що значна кількість досліджень зосереджена на окремих проблемах, або на загальній архітектурі СППР [7, 10], або на застосуванні гібридних методів для прогнозування [1, 9]. Недостатньо уваги приділено розробці комплексної алгоритмічної структури СППР, яка б ефективно інтегрувала гібридне прогнозування із механізмом прийняття управлінських рішень у реальному часі. Існуючі моделі часто потребують модернізації механізму обробки невизначеності для забезпечення адаптивного управління.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених окремим елементам системи, залишається невирішеною проблема розробки цілісної, адаптивної та гібридної інтелектуальної моделі СППР (ІСУПР), здатної перетворювати високоточні прогнози на оперативні, інтерпретовані управлінські рекомендації для аеропортових операторів. Саме на розробку такої комплексної концепції, яка органічно поєднує архітектурні вимоги з механізмами моделювання невизначеності через гібридний підхід спрямовано дане дослідження.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка концепції та алгоритмічної структури інтелектуальної моделі СППР, що базується на гібридних нейро-нечітких підходах. Модель повинна забезпечити рівномірний розподіл пасажирських потоків, оптимізацію використання ресурсів та підвищення якості сервісу в міжнародних аеропортах.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання взаємопов'язаних завдань. Необ-

хідно обґрунтувати доцільність застосування гібридних нейро-нечітких підходів для підвищення адаптивності та точності прогнозування в умовах невизначеності властивій авіаційним процесам. Визначити вхідні та вихідні параметри функціонування інтелектуальної моделі, а також джерела даних, що використовуватимуться для її навчання й перевірки. Розробити алгоритмічну структуру моделі системи.

Виклад основного матеріалу. Управління пасажиропотоками являється комплексною складовою організації авіаційної діяльності, спрямованою на забезпечення раціонального переміщення пасажирів у межах аеропорту від прибуття до відправлення. Процес управління охоплює моніторинг, планування, регулювання та контроль потоків у всіх вузлових зонах, як реєстрація, контроль безпеки, паспортний контроль, зони очікування та посадки. Основною метою цього процесу є мінімізація часу перебування пасажирів при збереженні високого рівня комфорту та безпеки.

Динаміка пасажиропотоків формується під впливом складної багатофакторної системи. На інтенсивність і структуру потоків впливають як внутрішні, так і зовнішні чинники.

Для вирішення задач прогнозування та управління пасажиропотоками в аеропортах застосовується широкий спектр методів, які можна класифікувати за підходами на п'ять основних груп. Проведено їх порівняльний аналіз, щоб визначити особливості застосування кожного підходу (рис. 1).

Попереднє визначення обсягів потоків дозволяє завчасно розподілити ресурси по персоналу та обладнанню, скоригувати графіки та уникнути перевантаження, а для інтеграції даних у реальному часі використовуються інформаційні системи управління аеропортом.

Поєднання інтелектуальних алгоритмів прогнозування та сучасних інформаційних систем формує основу адаптивного управління пасажиропотоками, що підвищує ефективність використання ресурсів і якість сервісу.

Інтелектуальні СППР в авіаційній галузі допомагають приймати ефективні управлінські рішення в умовах складності, невизначеності та динамічних змін, застосовуючись для аналізу, прогнозування, оптимізації розкладів, управління ресурсами. Проведено дослідження інтелектуальних підходів до управління пасажиропотоками та визначено методи, що дають змогу обробляти нечіткі, неповні або динамічні дані (рис. 2).

Серед методів, базованих на навчанні та знаннях, особливо значущими є нейромережеві моделі та нечіткі логічні системи. Нейромережеві моделі (ANN) навчаються на великих обсягах історичних даних, виявляють приховані закономірності та застосовуються для прогнозування кількості пасажирів і затримок. Як зазначено у [6, с. 117], «нейромережі активно використовуються для аналізу часових рядів та багатофакторного прогнозування». В той час нечіткі логічні системи (Fuzzy Logic) формалізують експертні знання у вигляді логічних правил. Fuzzy Logic

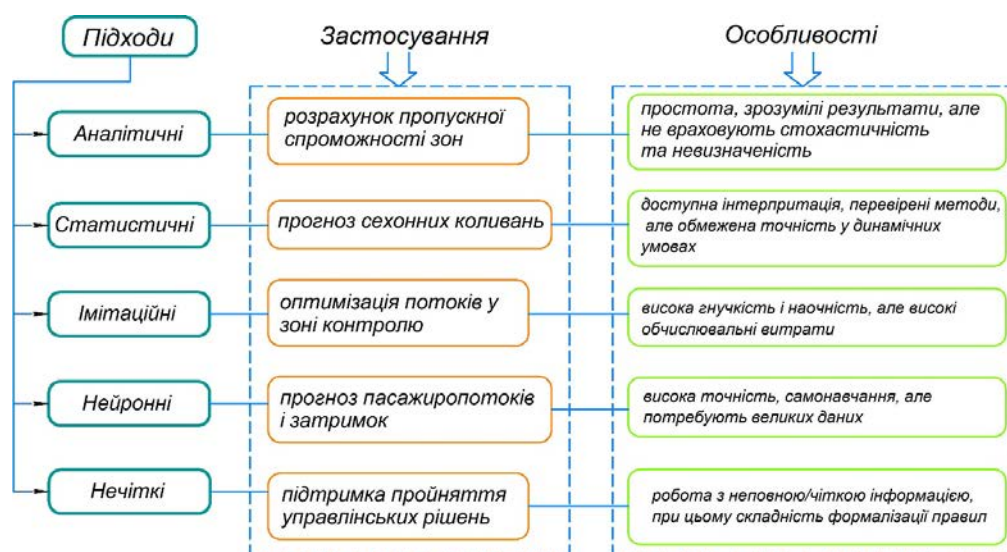


Рис. 1. Порівняльна характеристика основних підходів до прогнозування та управління пасажиропотоками

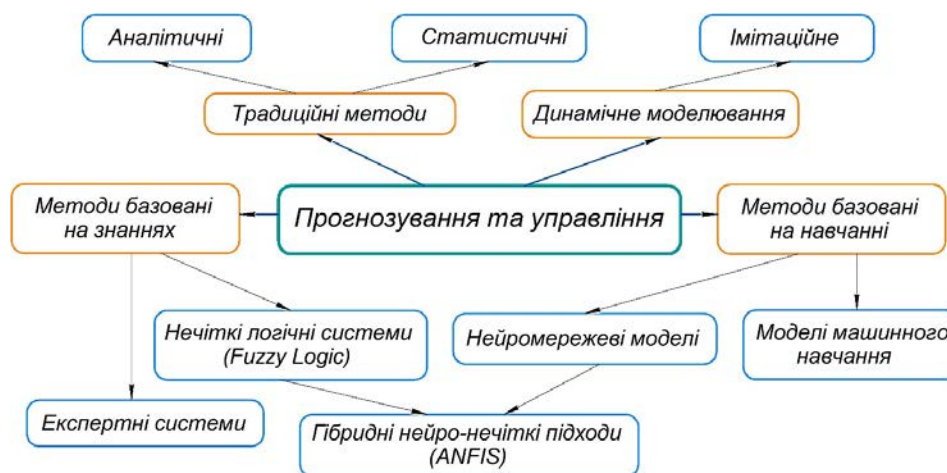


Рис. 2. Підходи до прогнозування та управління пасажиропотоками

краще моделюють невизначеність, властиву авіаційним процесам, зокрема варіаціям часу обслуговування або затримкам рейсів.

У результаті аналізу встановлено, що гібридні нейро-нечіткі підходи демонструють найвищу ефективність. Тому комбінування нечіткої логіки та нейронних мереж поєднує здатність нейромереж до навчання з інтерпретованістю нечітких моделей. Як наслідок, система зможе адаптивно коригувати правила прийняття рішень на основі поточних даних для управління пасажиропотоками в умовах швидкої зміни ситуації в аеропорту.

На основі проведеного аналізу запропоновано концепцію моделі інтелектуальної системи управління пасажиропотоками (ІСУПП) в аеропорту. Для побудови моделі визначено вхідні, проміжні та вихідні параметри функціонування системи (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри ІСУПП

Категорія	Параметри	Джерело даних
Вхідні дані	розклад рейсів, кількість пасажирів, стан погоди, типи літаків, час обслуговування, дані з турникетів і камер	системи аеропорту, API авіакомпаній, сенсори
Проміжні дані	історичні тренди, коефіцієнти сезонності, оцінка завантаження терміналів	аналітична база даних
Вихідні дані	прогноз обсягів пасажиропотоку, рекомендації з розподілу ресурсів, сценарії управлінських дій	СППР, оператори, системи планування

На базі визначених параметрів створено модель ІСУПП, яка складається з підсистеми збору даних, аналітичної підсистеми, прогностичного модуля, інтерфейса моніторингу та візуалізації і модуля підтримки прийняття рішень.

Алгоритмічна структура моделі ІСУПП приведена на рисунку 3. Вона описує комплексну гібридну СППР-модель, що поєднує і комбінує елементи з методів базованих на навчанні та методів базованих на знаннях, для генерації управлінських рекомендацій. Головним елементом системи є модуль прогнозування (5) використовуючий гібридні нейро-нечіткі підходи. Дана інтеграційна парадигма поєднує нейронні мережі і нечітку логіку. ANN забезпечують здатність системи до навчання на історичних даних, виявлення нелінійних залежностей та автоматичного налаштування параметрів, тобто компонент базований на навчанні. При цьому Fuzzy Logic забезпечує інтерпретованість системи та можливість моделювати невизначеність за допомогою лінгвістичних правил базованих на знаннях.

Функціонування моделі ІСУПП відбувається наступним чином. Інформація з реальних джерел (1 – систем реєстрації, контролю безпеки, сенсорів, камер, систем моніторингу рейсів) надходить в підсистему збору даних (2). На цьому етапі здійснюється первинна обробка даних, фільтрація шумів та усунення пропусків. Далі аналітичний модуль (3) виконує узгодження даних та їх детальний аналіз, використовуючи інформацію з бази даних знань (4) для формування чистих вхідних параметрів. На основі очищених даних модуль прогнозування (5) здійснює коротко- та середньострокове прогнозування обсягів пасажиропотоків. Для цього застосовуються інтелектуальні методи нечіткої логіки, нейромережі або гібридні нейро-нечіткі підходи. Система підтримки прийняття рішень (6) аналізує отримані результати прогнозу, формує оптимальні сценарії управління на основі нечітких правил і алгоритмів оптимізації.



Рис. 3. Структурна модель ІСУПП для управління пасажиропотоками

Сформовані рекомендації (7) візуалізуються для операторів аеропорту (8). Через інтерфейс моніторингу вони можуть переглянути поточний стан системи та оцінити запропоновані сценарії реагування. На підставі цього оператори приймають остаточні рішення та ініціюють управлінські дії.

Висновки. Впровадження ІСУПП, заснованої на гібридному підході, дозволяє суттєво підвищити точність прогнозування потоків пасажирів і своєчасність реагування на операційні зміни. Очікується значне скорочення часу очікування пасажирів у пікові години, раціональне використання інфраструктури терміналу та зменшення кількості нештатних ситуацій, пов'язаних із перевантаженням. Застосування інтелектуальних алгоритмів забезпечує стабільність функціонування системи та підвищення рівня безпеки й якості сервісу. Отримані результати підтверджують доцільність подальшого розвитку моделі ІСУПП як складової цифрової трансформації аеропортової інфраструктури.

Список літератури:

1. Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines* (3rd ed.). Pearson Education. Prentice Hall, 2009. 906 p. URL: <https://dai.fmph.uniba.sk/courses/NN/haykin.neural-networks.3ed.2009.pdf>
2. Russell S. J., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson. Berkeley, 2020. 1136 p. URL: http://lib.ysu.am/disciplines_bk/efdd4d1d4c2087fe1cbe03d9ced67f34.pdf
3. Hsu C. I., Yen J. M. Analysis of passenger flow in airport terminal with Monte Carlo simulation and Petri net. *Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers (ASCE)*. 132(11), 2006. Pp. 856–865. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:11(856).
4. Tam M., Lam W. H. Forecasting of air passenger traffic using seasonal ARIMA with intervention. *Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 134(11). 2008. Pp. 939–948. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:11(939).
5. Tosic V., Mirjana M. Intelligent decision support systems for airport operations management. *Transportation Research Procedia*. Elsevier, (30). 2018. Pp. 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.020>.
6. Єніна І. І., Бреус П. П. Прогнозування обсягу авіаційних перевезень із використанням нейронних мереж. *Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем*: зб. матеріалів XIII Міжнар. наук.-практич. конф., Кропивницький: УДЛІА, 2025. С. 117–120. URL: https://sfa.org.ua/images/docs/Zbirnyk_Konferentsiia_26022025r.pdf
7. Zou B., Hansen M., Yang B. Forecasting air passenger delay using artificial neural networks and multiple regression models. *Transportation Planning and Technology*. Taylor & Francis, 30(2). 2007. Pp. 173–193. <https://doi.org/10.1080/08905470701460515>.
8. Kumar D., Garg A. Hybrid ANFIS-GA model for forecasting the passenger flow in metro rail system. *Neural Computing and Applications*. Springer, 30(2). 2018. Pp. 521–531. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2580-2>
9. Wong K. F., Tsang E. C. A survey on intelligent decision support systems in airport terminal operations. *Journal of Advanced Transportation*. Wiley, 49(7). 2015. 896–914. <https://doi.org/10.1002/atr.1311>
10. Слабкий В. О., Шрамко В. О. Інтелектуальні системи управління аеропортовою діяльністю: архітектура та функціональність. *Науковий вісник НАУ. Серія: Технічні науки*. 2(3). 2019. С. 154–160.
11. Пономарьова О. М., Прохоренко В. А. Моделювання пасажиропотоків у транспортних вузлах з урахуванням невизначеності. *Проблеми та перспективи розвитку системи авіаційної безпеки*. 2020. 3(1). С. 74–81.

Chornogor N.O., Ienina I.I., Matsui A.M. INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM MODEL FOR PASSENGER FLOW MANAGEMENT IN AIRPORTS

The article explores and develops a conceptual framework for creating a dynamic intelligent Decision Support System model designed for the effective management of passenger flows in an airport environment. The relevance of the study is determined by the critical need to enhance the efficiency of airport logistics in response to the rapid growth of air traffic volumes and the significant irregularity of daily and seasonal loads. Traditional forecasting methods, which rely on fixed schedules and static data, have limited flexibility and insufficient accuracy under the dynamic uncertainty of aviation processes. The inefficiency of such approaches leads to infrastructure overload, the formation of prolonged queues in control zones, flight delays, and the irrational use of resources during peak periods. The goal of this research is to develop the concept and algorithmic structure of an intelligent DSS model based on hybrid neuro-fuzzy approaches. This model must ensure the uniform distribution of passenger flows, optimization of resource utilization, and improvement of service quality in international airports. To address these challenges, the proposed model integrates advanced intelligent technologies. The paper substantiates the use of the hybrid Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System approach, which serves as a highly effective tool for processing dynamic and uncertain data. ANFIS combines the self-learning and nonlinear pattern recognition capabilities of Artificial Neural Networks with the mechanisms of interpretability and uncertainty modeling of Fuzzy Logic. This combination ensures high forecasting accuracy and adaptive regulation of management rules based on current data. A holistic algorithmic structure of the Intelligent Passenger Flow Management System (IPFMS) has been developed. This structure encompasses all stages: from data collection and filtering (sensors, registration systems) to analysis in the analytical module, prognostic processing in the ANFIS module, and the generation of management recommendations in the DSS module, which applies fuzzy rules and optimization algorithms for decision-making. The model solves the problem of limited dynamism of traditional statistical and analytical methods under the constant stochasticity and uncertainty of aviation processes. The system's input parameters include flight schedules, passenger counts, weather conditions, data from turnstiles and cameras, while the outputs are the forecast of passenger flow volumes and recommendations for resource allocation. The expected qualitative outcomes of the model's implementation include a significant increase in the accuracy of passenger flow forecasting and a reduction in passenger waiting times during peak hours. This will contribute to the rational utilization of terminal infrastructure and a decrease in irregular situations related to congestion and delays. Thus, the application of the IPFMS ensures the stability of airport operations, an increase in the level of safety and service quality, confirming the expediency of the model's further development as a key component of the digital transformation of airport infrastructure.

Key words: intelligent model, passenger flows, adaptive management, hybrid approaches, neuro-fuzzy logic, organization of aviation activities, aviation transport infrastructure, operator.

Дата надходження статті: 23.11.2025

Дата прийняття статті: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.04:691.3:69.059:004.94(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/54>

Варивода Ю.Ю.

Львівський національний університет ветеринарної
медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького

Корчевський Б.Б.

Вінницький національний технічний університет

Дідок В.Ю.

Київський національний університет будівництва і архітектури

ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УКРАЇНІ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ І ТЕХНОЛОГІЙ

Актуальність дослідження зумовлена нагальною потребою України у формуванні науково обґрунтованих підходів до відновлення критичної інфраструктури після масштабних руйнувань, спричинених російською військовою агресією. Відбудова має спиратися не лише на швидке відновлення функціональності, а й на забезпечення довговічності, енергоефективності та технологічної стійкості споруд. У цьому контексті впровадження сучасних матеріалів і цифрових технологій є визначальним чинником підвищення надійності інженерних систем і адаптивності інфраструктури до майбутніх викликів.

Мета статті – проаналізувати інноваційні методи відновлення критичної інфраструктури України на основі використання сучасних матеріалів і цифрових технологій з урахуванням вимог стійкості, енергоефективності та безпеки.

Методологія дослідження ґрунтується на системному, структурно-функціональному та порівняльно-аналітичному підходах із застосуванням методів експертного оцінювання, техніко-економічного аналізу та моделювання життєвого циклу інженерних споруд. Для узагальнення практики використано кейси українських і міжнародних проєктів відбудови, що охоплюють технології ультрависокооефективного бетону (UHPC), композитного армування (FRP), 3D-друку, систем моніторингу та цифрових двійників.

Результати дослідження полягають у визначенні структурних компонентів процесу відновлення, систематизації потенціалу сучасних матеріалів і технологій, а також обґрунтуванні переваг цифрової інтеграції у відбудовчих процесах. Доведено, що застосування UHPC, FRP-армування, самовідновних цементів, технологій 3D-друку та цифрового моделювання сприяє підвищенню міцності конструкцій на 30–50 %, скороченню термінів реконструкції на 40–60 % і зниженню експлуатаційних витрат до 25 %.

У дослідженні акцентовано на необхідності переходу до нормативно узгодженої та цифрово інтегрованої системи реконструкції, у межах якої інноваційні матеріали та технології стають стандартом технічної політики держави, а не винятком із неї. Встановлено, що ефективно відновлення потребує уніфікації нормативних документів, розвитку локальних виробництв і створення єдиного центру цифрового моніторингу об'єктів критичної інфраструктури.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням національних стандартів сертифікації інноваційних матеріалів, впровадженням систем штучного інтелекту в моніторинг споруд, створенням національної платформи цифрових двійників і розробленням освітніх програм нового покоління для інженерів та управлінців у сфері стійкого відновлення.

Ключові слова: відбудова, стійкість, ультрависокооефективний бетон, композитне армування, цифрові двійники, моніторинг споруд, 3D-друк, енергоефективність, життєвий цикл, інженерна модернізація.

© Варивода Ю.Ю., Корчевський Б.Б., Дідок В.Ю., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Проблематика відновлення критичної інфраструктури України набуває особливого значення в умовах воєнних руйнувань, енергетичних криз і потреби забезпечення стійкості державних систем життєзабезпечення. Руйнування транспортних, енергетичних, водопостачальних і комунікаційних мереж зумовлює не лише технічні, а й соціально-економічні ризики, що безпосередньо впливають на безпеку населення, функціонування промисловості та загальну відновлювану спроможність держави. Водночас традиційні методи реконструкції виявилися неефективними в умовах високої динаміки бойових дій, обмеженості ресурсів і необхідності швидкого реагування на вторинні пошкодження. Це зумовлює потребу в розробленні інноваційних підходів, що ґрунтуються на застосуванні сучасних матеріалів, цифрових технологій і принципів сталого розвитку.

Науковий інтерес до цієї проблеми визначається необхідністю формування нової парадигми відновлення, що інтегрує досягнення матеріалознавства, будівельної механіки, енергетичного інжинірингу та інформаційних технологій.

Зокрема, значну наукову актуальність мають дослідження фізико-механічних властивостей високоміцних і самовідновних бетонів, композитних систем армування, технологій 3D-друку будівельних конструкцій, а також цифрових інструментів моделювання, зокрема цифрових двійників (digital twin), що дають змогу здійснювати прогнозування поведінки споруд у режимі реального часу. На прикладному рівні реалізація таких рішень сприятиме підвищенню оперативності відбудови, зниженню вартості та забезпеченню надійності об'єктів критичної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних досліджень дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані наукові напрями.

Перший напрям охоплює організаційно-інституційні засади відбудови та публічно-приватного партнерства. У праці Г. Кузьменко та А. Телендія розглянуто інноваційні моделі публічно-приватного партнерства, зорієнтовані на поєднання фінансових, управлінських і технологічних ресурсів у процесі відновлення зруйнованих територій. Автори підкреслюють роль держави як регулятора, що формує нормативно-правові передумови для участі бізнесу у відбудові, а також значення цифрових механізмів прозорого моніторингу реалізації проєктів [1]. Подібні підходи до інституційної стійкості відновлюваних процесів підтримує Р. Плахотнюк, який визначає необхідність

створення системи управління ризиками критичної інфраструктури, що заснована на принципах резильєнтності та стратегічного планування [7]. Окрім того, у статті О. Лазора та співавторів узагальнено засади державної стратегії повоєнного відновлення, де наголошено на поєднанні централізованого управління з інструментами регіональної децентралізації та цифрової координації [8]. Подальші дослідження в цьому напрямі мають бути спрямовані на розроблення адаптивних моделей публічно-приватної взаємодії, які будуть забезпечувати баланс інституційних, економічних і технологічних складників відбудови.

Другий напрям присвячено техніко-технологічним аспектам реконструкції об'єктів критичної інфраструктури. Зокрема А. Блонний розробив адаптивні моделі організації будівництва в умовах кризових ситуацій, що базуються на застосуванні інноваційних будівельних матеріалів, 3D-друку та цифрових моделей управління життєвим циклом споруд (BIM-технологій) [2]. У дослідженні О. Шпатакової та співавторів висвітлено перспективи відновлення критичної інфраструктури на деокупованих територіях України, де акцентовано на важливості поєднання інженерних рішень і мобільних будівельних систем для оперативної реконструкції об'єктів енергетики, транспорту та комунікацій [3]. Значний внесок у розроблення цифрових інструментів оцінювання пошкоджень зробив Ю. Дрейс, який запропонував метод оцінювання наслідків втрати об'єкта критичної інформаційної інфраструктури за узагальненими критеріями, придатний для побудови аналітичних моделей моніторингу стану мереж [5]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно зосередити на розробленні комплексних систем цифрової діагностики та прогнозування пошкоджень, що інтегрують штучний інтелект і сенсорні технології.

Третій напрям охоплює еколого-інноваційну трансформацію та сталий розвиток інфраструктури. У статті В. Микитенка обґрунтовано концепцію повоєнного відновлення на засадах збалансованого розвитку, що передбачає впровадження енергоефективних технологій, раціональне використання ресурсів і формування екологічно безпечних інфраструктурних систем [4]. У дослідженні Н. Мороз і В. Косик здійснено аналіз проблем і напрямів реконструкції інфраструктури України, де визначено необхідність інтеграції екологічних стандартів, запровадження механізмів оцінювання впливу на довкілля та розроблення проєктів «зеленого будівництва» [6]. Водночас у праці Г. Кришталь (Н. Kryshstal) та спі-

вавторів обґрунтовано концепцію *eco-innovative transformation* міської інфраструктури України, що передбачає поєднання екологічних технологій, повторного використання будівельних матеріалів та енергозберігальних рішень у системах реконструкції [9]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на створення національної системи «зелених» стандартів будівництва, гармонізованих з європейськими ESG-критеріями (*environment, social, governance*) та принципами циркулярної економіки.

Четвертий напрям стосується інженерно-безпекових і соціально-економічних аспектів резильєнтності критичної інфраструктури. Так, О. Амоша (O. Amosha) та співавтори здійснили макроекономічне оцінювання процесів відновлення інфраструктури України. Вони визначили ключові чинники ефективності: координацію між секторами, залучення інвестицій, стандартизацію будівельних рішень і впровадження цифрових технологій управління [10]. Окрім того, Д. Арманіос (D. Armanios) та співавтори аналізують український досвід цивільної інженерії, підкреслюючи здатність фахівців адаптувати міжнародні стандарти відбудови до умов постійної загрози та обмежених ресурсів [11]. Натомість А. Шумовський (A. Szumowski) узагальнив уроки функціонування критичної інфраструктури під час війни у період 2022–2024 років, наголосивши на важливості автономних енергетичних систем, регіональної децентралізації та підготовки кадрів для забезпечення стійкості інфраструктури [12]. У праці Т. Чернявської (T. Cherniavska) та Б. Чернявського (B. Cherniavskyi) розроблено концепт *Digital Reconstructor*, що інтегрує цифрові двійники в процеси реконструкції пошкоджених територій, поєднуючи інженерні, екологічні та безпекові аспекти відновлення [13]. Подальші дослідження цього напрямку мають бути зосереджені на формуванні національної системи інфраструктурної резильєнтності, що забезпечить технологічну, екологічну та соціальну стійкість відбудови в умовах воєнних і післявоєнних викликів.

Попри наявні наукові напрацювання, невирішеними залишаються питання формування цілісної моделі відновлення критичної інфраструктури в умовах воєнних руйнувань, практичної адаптації інноваційних матеріалів (UHPC, FRP-армування, самовідновні цементи), інтеграції цифрових технологій (моніторинг, 3D-друк, цифрові двійники) та нормативного забезпечення їхнього застосування. Окрім того, недостатньо досліджено еконо-

мічну ефективність і довговічність таких рішень у реальних масштабах, а також бракує методів оцінювання життєвого циклу об'єктів.

Запропоноване дослідження усуває зазначені прогалини шляхом обґрунтування інноваційних методів відновлення, що поєднують сучасні матеріали, цифрове моделювання та адаптивне управління. Сформовано науково-практичне підґрунтя для оновлення стандартів, оптимізації рішень і створення ефективної системи стійкого технологічного відновлення критичної інфраструктури України.

Постановка завдання. Мета статті – проаналізувати інноваційні методи відновлення критичної інфраструктури України на основі сучасних матеріалів і технологій з урахуванням вимог стійкості, енергоефективності та безпеки.

Завдання дослідження:

1. Визначити сутність і структурні засади процесу відновлення критичної інфраструктури в умовах воєнних руйнувань та післявоєнної реконструкції.

2. Дослідити потенціал сучасних матеріалів і цифрових технологій для підвищення надійності, довговічності та ефективності відбудови інженерних споруд.

3. Виявити головні труднощі впровадження інноваційних рішень і сформулювати практичні рекомендації щодо створення стійкої системи технологічного відновлення.

Виклад основного матеріалу. Процес відновлення критичної інфраструктури в Україні в умовах воєнних руйнувань і післявоєнного відновлення має системний і багаторівневий характер, що поєднує технічні, організаційні, та управлінські компоненти. Його сутність полягає у відновленні функціональної спроможності об'єктів життєзабезпечення держави – енергетичних систем, транспортних мереж, об'єктів водопостачання, зв'язку та цивільного захисту – на засадах стійкості, адаптивності та технологічної інноваційності. На відміну від традиційного підходу, зорієнтованого на просте відтворення зруйнованих елементів, сучасна модель відновлення передбачає перехід до концепції «розумного відновлення» (*smart recovery*), що передбачає прогнозування ризиків, цифрове моделювання, використання швидкокомонтажних модулів і матеріалів із заданими експлуатаційними властивостями (табл. 1).

У практичному вимірі структурні компоненти процесу відновлення критичної інфраструктури України реалізуються через інтегроване поєднання

Таблиця 1

Структурні компоненти процесу відновлення критичної інфраструктури

Компонент	Зміст	Очікуваний результат
Технічний	Відновлення несучих і функціональних елементів споруд із застосуванням високоміцних, самовідновних і композитних матеріалів	Підвищення міцності, довговічності та стійкості до повторних пошкоджень
Технологічний	Використання 3D-друку, автоматизованого моніторингу, цифрових моделей (digital twin) для управління процесом реконструкції	Скорочення строків відновлення, підвищення точності та контроль якості
Організаційно-управлінський	Координація дій між державними, муніципальними та приватними структурами, застосування принципів адаптивного управління	Забезпечення оперативності та ефективного розподілу ресурсів
Нормативно-правовий	Гармонізація будівельних норм із міжнародними стандартами, спрощення процедур погодження проєктів	Підвищення прозорості, зменшення бюрократичних перешкод
Соціально-економічний	Формування економічно обґрунтованих моделей відновлення із залученням місцевих громад і бізнесу	Стимулювання зайнятості, підвищення соціальної стабільності

Джерело: сформована на основі [1, с. 73–74; 2, с. 205–206; 4, с. 126–127; 6, с. 78–79; 7, с. 50–51; 8, с. 5–6].

матеріалознавчих інновацій, технологічно-управлінських рішень інформативної адаптації. У цьому контексті технічний компонент набув конкретного втілення в проєктах швидкого відновлення транспортних шляхів за рахунок постачання модульних мостів типу Acrow та Mabey Compact 200, які фінансуються Світовим банком у межах цільової програми підтримки Агентства відновлення [14]. Згідно з офіційними даними, до України вже доставлено перші 12 комплектів таких мостів загальною довжиною понад 475 метрів, які встановлюються в постраждалих регіонах для відновлення стратегічних транспортних сполучень [15]. З огляду на це, аналітичний звіт Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3) засвідчує, що прямі збитки критичної інфраструктури України внаслідок російської агресії перевищують 150 млрд дол. США, причому понад третину цієї суми становлять втрати у сфері транспорту, енергетики та комунального господарства [16]. Отже, ці дані формують доказову базу для визначення пріоритетних напрямів відновлення й раціонального розподілу ресурсів. Організаційно-управлінський компонент процесу полягає у створенні мережі координаційних структур, які забезпечують адаптивне управління ресурсами. На рівні регіонів діють штаби відновлення, що координують діяльність державних органів, військових адміністрацій і приватних підприємств, оптимізуючи логістику та скорочуючи часові втрати між фіксацією руйнування й початком відбудов. Нормативно-правовий рівень сприяє прискореному проєктуванню та будівництву об'єктів у період

воєнного стану. Це дає змогу мінімізувати бюрократичні бар'єри та збереження вимог до безпеки і якості. Водночас соціально-економічний складник відновлення ґрунтується на активному залученні місцевих виробників і громад, що сприяє розвитку регіональних ринків будівельних матеріалів, зменшенню імпортової залежності та створенню робочих місць. Окрім того, сучасна модель відновлення критичної інфраструктури України демонструє поєднання матеріалознавчих рішень, міжнародної технічної підтримки, управлінської децентралізації та нормативної гнучкості, що в комплексі забезпечує підвищення стійкості та автономності інфраструктури держави.

Сучасні матеріали та технології відіграють ключову роль у формуванні стійкої системи відбудови інженерних споруд, забезпечуючи поєднання високої швидкості будівництва з довговічністю та мінімальними витратами на утримання. Їхній потенціал визначається не лише технічними параметрами, а й здатністю адаптуватися до обмежених ресурсів, кліматичних коливань і повторних навантажень, що є актуальним для українського контексту після масштабних руйнувань (табл. 2).

У практиці української післявоєнної відбудови сучасні матеріали та технології функціонують синхронно, переводячи ремонт у режим підвищення довговічності. Ультрависокоєфективний бетон (UHPC) використовується для безшовного з'єднання плит (link slabs), що дає змогу зменшити товщину настилу, знизити деформації в опорних зонах і продовжити строк служби прольотних споруд. Методика проєктування та при-

Потенціал сучасних матеріалів і технологій у відбудові інженерних споруд

Матеріал / технологія	Ключові характеристики	Очікуваний ефект у відбудові
Ультрависокоєфективні цементні композиції (UHPC)	Міцність понад 150 МПа, низька пористість, висока тріщиностійкість і морозостійкість	Зменшення маси конструкцій, подовження ресурсу, скорочення термінів монтажу
Композитне армування (FRP)	Легкість, відсутність корозії, діелектричність, довговічність понад 80 років	Заміна сталевих арматур у бетоні, зниження ваги споруд і ремонтпридатність
Самовідновні цементні системи	Бактеріальні чи капсульні домішки, що активуються у разі появи тріщин	Автономне відновлення матеріалу, зниження витрат на ремонт і продовження експлуатаційного циклу
Холодне газодинамічне напilenня (Cold Spray)	Відновлення сталевих елементів без теплової деформації, висока адгезія	Ремонт опор, резервуарів і металоконструкцій без демонтажу
Модульні збірні конструкції	Стандартизовані секції, висока швидкість монтажу, мобільність	Відновлення транспортних сполучень протягом кількох діб, можливість повторного використання

Джерело: сформовано на основі [2, с. 208–210; 3, 9, р. 397–398; 10, р. 175–176; 11, р. 100–101; 13, р. 140–141].

клади її практичного застосування системно представлено в керівництві Федерального управління автомобільних доріг США (FHWA), яке виступає методологічним орієнтиром у процесі відновлення зруйнованих мостових споруд в Україні [17]. Композитне армування (FRP), зокрема базальтове, скловолоконне чи вуглецеве, усуває корозійний чинник у бетоні, зменшує масу елементів і спрощує логістику до важкодоступних локацій. Експериментально-розрахункову базу для базальтової арматури узагальнено у вітчизняних публікаціях дорожньо-мостової тематики, що підтверджує економічні та технологічні переваги цього підходу [18]. Самовідновні цементні системи, зокрема бактеріальні, підтверджені повномасштабними демонстраторами TU Delft. Так, за наявності вологи бактеріальні клітини ініціюють формування кальцитових кристалів мостикового типу, які заповнюють і герметизують тріщини завширшки до 1 мм. Це призводить до зниження проникності матеріалу та, відповідно, до зменшення потреби в експлуатаційних ремонтах у водонасичених і низькотемпературних умовах [19, с. 138].

Для сталевих елементів мостів, резервуарів і гідроенергетичних об'єктів холодне газодинамічне напilenня дає змогу відновлювати втрати металу без теплових деформацій і демонтажу, що є критично важливим у коротких «вікнах можливостей» під час обстрілів. Зокрема, в українських працях, які присвячені газотермічним покриттям, подано параметри процесу та визначено сфери застосування цієї технології [20, с. 152]. З огляду на це, у межах проекту Світового банку у березні 2024 р. перша партія з 12 комплектів загальною довжиною 475 м офіційно прибула до України

для оперативного розгортання Агентством відновлення [21]. Публічні кейси швидкого введення в експлуатацію демонструють практичну швидкість і вантажопідйомність. Наприклад, на дорозі Р-24 встановлено новий модульний міст ACROW Mabey C200, який забезпечив відновлення регіонального сполучення після визнання попередньої споруди аварійною [22]. Окрім того, Міністерство інфраструктури України повідомляло про подальші поставки тимчасових мостів і міжнародну допомогу (від Швеції, Чехії, Норвегії, Франції), що створює стійкий резерв потужностей для швидкого розгортання переправ у прифронтових і деокупованих районах [23].

Процес застосування цифрових технологій у реконструкції об'єктів критичної інфраструктури України доцільно розглядати як інтеграцію трьох взаємозалежних підходів: систем моніторингу стану із використанням сенсорів та IoT-мереж (Internet of Things), адитивного виробництва (3D-друк) для швидкої заміни чи підсилення елементів інженерних споруд, а також цифрових двійників (digital twin) як інструменту моделювання, прогнозування й управління станом об'єктів у режимі реального часу. У цьому контексті моніторинг забезпечує збір даних про деформації, корозію, навантаження та вібрації. Натомість 3D-друк дає змогу відтворювати чи доповнювати конструкції навіть у складних або небезпечних умовах, а digital twin надає можливість моделювати поведінку споруди, оцінювати сценарії пошкоджень та оптимізувати обслуговування. В умовах, коли в Україні зруйновано значну кількість мостів, промислових будівель і транспортних вузлів, такі технології стають не просто додатковим інструментом, а необхідністю,

Цифрові технології в реконструкції критичної інфраструктури

Технологія	Головна функція	Очікуваний ефект у відновленні
Системи моніторингу (IoT-сенсори, вібрація, корозія)	Безперервне спостереження за станом конструкцій	Своєчасне виявлення дефектів, зменшення аварійних простоїв
3D-друк будівельних конструкцій та елементів	Швидке виготовлення або доповнення елементів безпосередньо на майданчику	Скорочення термінів монтажу, зменшення потреби у великій кількості робочої сили та матеріалів
Цифрові двійники (digital twin)	Цифрова модель, що імітує фізичний об'єкт, оновлюється даними моніторингу	Оптимізація плану обслуговування, прогнозування поведінки споруди, мінімізація витрат

Джерело: сформовано на основі [5, с. 493–495; 9, р. 402–403; 10, р. 179–180; 11, р. 102; 13, р. 142–143].

адже час реагування має бути мінімальним, нато- мість ресурси є обмеженими, ризики – високими. Цифрові технології допомагають скорочувати часові лаги між фіксацією руйнування і віднов- ленням, підвищувати точність обстеження, зни- жувати логістичні втрати та переходити до умов «розумної» реконструкції (табл. 3).

Цифрові технології в умовах війни в Україні стають визначальним компонентом інженерного управління, оскільки дають змогу одночасно під- вищувати точність діагностики, прискорювати реконструкцію та забезпечувати контроль якості в реальному часі. Використання систем моніто- рингу, адитивного виробництва (3D-друку) та цифрового моделювання забезпечує новий рівень інтеграції даних – від польових сенсорів до про- гнозних моделей, що імітують поведінку об'єктів під навантаженнями. Науково обґрунтовано, що така цифровізація відновлення скорочує час між фіксацією руйнування та початком ремонтних робіт у середньому на 40–60 %, підвищуючи ефективність використання ресурсів і надійність відновлених конструкцій. Найбільш показовим прикладом є впровадження технології 3D-друку у будівництві об'єктів соціальної інфраструк- тури. У 2023 р. у м. Львові реалізовано перший в Україні проєкт друкованої школи за технологією COBOD BOD2 – будівлю площею 370 м² було зведено за 40 годин друку та введено в експлуа- тацію менш ніж за три тижні [24]. З огляду на це, доцільність адитивних рішень у кризових умовах підтверджується тим, що зменшується потреба в масових будівельних бригадах, знижується спо- живання матеріалів на 30 %, а собівартість кон- струкцій – на 20 %. У межах реконструкції зруй- нованих об'єктів у південних регіонах подібні системи вже застосовуються для виготовлення захисних споруд і модульних укриттів, що підви- щує мобільність та адаптивність будівництва.

Варто більш детально зупинитися на іншому напрямі – цифрових двійниках (digital twin), що

інтегрують дані сенсорних систем моніторингу з аналітичними моделями об'єктів. Такі рішення використовуються у м. Києві та м. Дніпрі для ство- рення віртуальних моделей інженерних мереж і транспортних вузлів, що дає змогу прогнозувати ризики аварій та пріоритезувати ремонтні ресурси [25]. Практичні результати демонструють скоро- чення аварійних збоїв на 25 % і економію бюджет- них коштів на експлуатацію до 15 %. Авторське узагальнення свідчить, що цифровий двійник перетворює відбудову на адаптивний процес, у якому рішення ґрунтуються не на припущеннях, а на даних, що безперервно оновлюються. Таким чином, інтеграція систем моніторингу, 3D-друку та цифрового моделювання в процес реконструк- ції критичної інфраструктури забезпечує перехід від реактивного до прогнозного управління. Це не лише підвищує стійкість споруд до повторних навантажень, а й формує підґрунтя для створення національної платформи цифрового відновлення, яка поєднує наукові підходи з оперативними потребами практики.

Головні бар'єри впровадження інноваційних рішень у відновлення критичної інфраструктури України зосереджені в нормативно-технічній, орга- нізаційній і фінансовій площинах. Нормативна база залишається неузгодженою з сучасними матеріа- лами та технологіями: чинні Державні будівельні норми (ДБН) не регламентують застосування ультрависокоєфективного бетону, композитного армування, самовідновних цементів і технологій 3D-друку [2, с. 205–206; 9, р. 397–398]. Відсут- ність процедур сертифікації та державних методик випробувань змушує орієнтуватися на іноземні стандарти, що ускладнює проєктування та сповіль- нює проведення експертизи.

Технічні проблеми полягають у фрагментар- ності систем моніторингу та низькій інтегрованості даних. Сенсори, безпілотні обстеження та SCADA- комплекси функціонують розрізнено, без єдиної цифрової платформи, що обмежує створення цифро-

вих двійників і прогнозне управління [5, с. 493–495]. Окрім того, більшість підприємств експлуатують застаріле обладнання, несумісне з сучасними аналітичними модулями, а високий рівень імпортозалежності ускладнює технічне оновлення.

Водночас організаційно-фінансові обмеження зумовлені розпорошенням повноважень між міністерствами і донорами, складністю бюджетного фінансування та процедур закупівель. Інноваційні проекти часто не вписуються в стандартні класифікатори Prozoggo, а багаторівнева система погоджень сповільнює реалізацію навіть критично необхідних рішень [1, с. 74–75]. Додатковим чинником є кадровий дефіцит інженерів і спеціалістів із цифрового моделювання, що стримує масштабування інновацій. У комплексі це формує системну інерцію: технологічний прогрес випереджає нормативні рамки, а інституційна роз'єднаність і дефіцит компетенцій перешкоджають швидкому впровадженню навіть економічно обґрунтованих рішень.

З огляду на зазначене, ефективна система відновлення критичної інфраструктури має будуватися на результатноорієнтованих вимогах і стандартизованих рішеннях, що забезпечують швидкість розгортання та довговічність. Доцільно запровадити проектування за показниками (міцність, тріщиностійкість, корозійна стійкість, ремонтпридатність, цільовий строк служби) з легітимним включенням UHPC, FRP-армування та самовідновних цементів; сформувати національний каталог типових модулів (мости, підпірні стінки, насосні й розподільчі пункти) з уніфікованими вузлами, сертифікованими матеріалами та картами технологічного контролю. Окрім того, важливо стандартизувати системи моніторингу стану (мінімальний профіль датчиків, калібрування, частоти збору, кіберзахист, відкриті протоколи) з інтеграцією в платформи інформаційного моделювання будівель (BIM) та геоінформаційні системи (ГІС), а також у цифрові двійники для мостів, доріг, енерго- та водооб'єктів. Закупівельну діяльність доцільно переводити на рамкові договори та динамічні системи, орієнтовані на інноваційні матеріали й сенсорні технології, із запровадженням попередньої кваліфікації постачальників. Технічне регулювання слід здійснювати за принципом швидких треків через використання тимчасових технічних умов, експериментальних технічних свідоцтв і регуляторних пісочниць із подальшим урахуванням їх результатів у державних і галузевих будівельних нормах. Економіку прийняття рішень варто буду-

вати на основі аналізу повного життєвого циклу (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA) із застосуванням контрактів типу SLA (Service Level Agreement), які визначають криві відновлення та передбачають систему bonus-malus залежно від фактичної надійності й часу відновлення. Для зменшення залежностей і прискорення робіт варто розвивати локальні ланцюги постачання (виробництво UHPC-сумішей, базальтової/скловолоконної арматури, модульних секцій), створити стратегічні резерви швидкого реагування (модульні прольоти, трансформаторні блоки, трубні лайнер-системи, комплекти SHM (Structural Health Monitoring)) з логістикою, що гарантує мобілізацію у 72 години; розгортати «пілотні коридори відновлення» (порт – кордон – медичний хаб), де пакетно відпрацьовуються рішення (UHPC + FRP + модулі + SHM + digital twin) з подальшим масштабуванням; забезпечити кадрову спроможність через короткі інженерні програми (UHPC/FRP/SHM/BIM, управління життєвим циклом), міжвідомчі мобільні бригади та залучення наукових центрів до постпроектного аудиту об'єктів. Зважаючи на це, критичною умовою залишається кіберстійкість: сегментація ОТ-мереж (Operational Technology), нульова довіра до доступів, резервування даних моніторингу та симуляційних моделей, що в комплексі переводить процес відновлення з реактивного в прогнозно-керований режим і забезпечує сталу експлуатацію об'єктів у довгостроковій перспективі.

Висновки. У ході дослідження встановлено, що ефективне відновлення критичної інфраструктури України потребує переходу від фрагментарних ремонтних дій до системного технологічного підходу, де ключову роль відіграють сучасні матеріали (UHPC, FRP, самовідновні цементи) та цифрові інструменти (моніторинг, 3D-друк, цифрові двійники). Їх інтеграція забезпечить скорочення термінів реконструкції, підвищення довговічності споруд і прозорість управління життєвим циклом об'єктів. Виявлено, що головними проблемами залишаються нормативна неврегульованість застосування інноваційних матеріалів, відсутність уніфікованих процедур сертифікації, роз'єднаність інформаційних систем моніторингу, а також нестача фахівців, які здатні поєднувати інженерні та цифрові компетентності. Ці чинники зумовлюють повільне технологічне оновлення та неефективність управлінських рішень. Розроблені рекомендації доводять, що створення єдиної нормативно-цифрової екосистеми з використанням модульних рішень, відкритих стандартів моніторингу, локалізованих

виробництв і результаторієнтованого проектування дає змогу перейти від реактивного до прогностичного управління відбудовою.

Перспективи подальших досліджень полягають у науковому обґрунтуванні національних стандартів для інноваційних матеріалів, розро-

бленні алгоритмів автоматизованого моніторингу з використанням штучного інтелекту, створенні прототипів цифрових двійників для стратегічних об'єктів і формуванні новітніх освітніх програм для фахівців із цифрового інжинірингу та сталого відновлення.

Список літератури:

1. Кузьменко Г., Телендій А. Інноваційні моделі публічно-приватного партнерства у відбудові зруйнованих територій: виклики та можливості. *Наукові праці Міжрегіональної Академії управління персоналом. Політичні науки та публічне управління*. 2024. Вип. 4, № 76. С. 71–77. DOI: [https://doi.org/10.32689/2523-4625-2024-4\(76\)-9](https://doi.org/10.32689/2523-4625-2024-4(76)-9).
2. Блонний А. Оптимізація будівництва в умовах кризових ситуацій та подальшого відновлення: адаптивні моделі для критичної інфраструктури. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2024. Вип. 2, № 54. С. 200–213. URL: <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/341397/329333> (дата звернення: 27.10.2025).
3. Шпатакова О., Іваненко Р., Погребиський М. Перспективи відновлення критичної інфраструктури на деокупованих територіях України. *Економіка та суспільство*. 2022. Вип. 40. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-40-5>.
4. Микитенко В. В. Повоєнне відновлення та розвиток критичної інфраструктури України. *Вісник економічної науки України*. 2023. № 1, № 44. С. 124–138. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.1\(44\).124-138](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.1(44).124-138).
5. Дрейс Ю. Метод оцінювання наслідків втрати об'єкта критичної інформаційної інфраструктури за узагальненими критеріями. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. Вип. 1, № 25. С. 487–504. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.487504>.
6. Мороз Н. В., Косик В. М. Відновлення інфраструктури України: проблеми і напрямки. *Галицький економічний вісник*. 2025. Вип. 92, № 1. С. 77–85. DOI: https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2025.01.077.
7. Плахотнюк Р. Забезпечення стійкості критичної інфраструктури в Україні в умовах сучасних викликів. *Економічний простір*. 2024. № 195. С. 47–54. DOI: <https://doi.org/10.30838/EP.195.47-54>.
8. Лазор О. Я., Юник І. Г., Заболотний А. В. Державна стратегія повоєнного відновлення та розвитку критичної інфраструктури в Україні. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2024. № 4. С. 1–19. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2156.2024.4.2>.
9. Kryshtal H., Tomakh V., Ivanova T., Metelytsia V., Yermolaieva M., Panin Y. Eco-innovative transformation of the urban infrastructure of Ukraine on the way to post-war recovery. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*. 2024. Vol. 2, No.55. P. 391–408. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptop.2.55.2024.4281>.
10. Amosha O., Cherevatskyi D., Amosha O., Kvilynskyi O. Ukraine infrastructure post-war recovery. *Journal of European Economy*. 2024. Vol. 23, No.1. P. 168–184. DOI: <https://doi.org/10.35774/jee2024.01.168>.
11. Armanios D., Christensen J. S., Tymoshenko A. What Ukraine Can Teach the World About Resilience and Civil Engineering. *Issues in Science and Technology*. 2023. Vol. 40, No.1. P. 98–103. URL: <https://www.jstor.org/stable/27379621> (date of access: 08.03.2025).
12. Szumowski A. Critical Infrastructure Importance during the War in Ukraine 2022–2024. *Contemporary Security Problems of Poland and the Czech Republic*. 2024. Vol. 1. P. 171–192. URL: https://wydawnictwo.umcs.eu/js/elfinder/files/Ebook/Contemporary_Security.pdf#page=172 (date of access: 26.10.2025).
13. Cherniavska T., Cherniavskyi B. Digital Reconstructor: Integration of Digital Twins for the Reconstruction and Remediation of War-Affected Territories in Ukraine. *UKLO Proceedings*. 2025. Vol. 1, No.1. P. 137–145. DOI: <https://doi.org/10.20544/AISC.1.1.25.P13>.
14. Агентство відновлення отримало 12 модульних мостів від Світового банку. Укрінформ. 2024. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-vidbudova/3843428-agentstvo-vidnovlenna-otrimalo-12-modulnih-mostiv-vid-svitovogo-banku.html> (дата звернення: 26.10.2025).
15. UNOPS and World Bank support restoration of Ukraine's transport network. UNOPS. 2024. URL: <https://www.unops.org/news-and-stories/news/unops-and-world-bank-support-restoration-of-ukraines-transport-network> (date of access: 26.10.2025).
16. Ukraine: Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3) – February 2022 – December 2023. World Bank. 2024. URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099021324115085807> (date of access: 26.10.2025).
17. Design and Construction of UHPC-Based Link Slabs. *Federal Highway Administration*. 2022. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/22065/22065.pdf> (date of access: 27.10.2025).

18. Дослідження неметалевої композитної базальтової арматури періодичного профілю та перспективи її застосування. Дороги і мости. 2021. URL: <https://dorogimosti.org.ua/ua/doslidghennya-nemetalevoyi-kompozitnoyi-bazalytovoyi-armaturi-periodichnogo-profilu-ta-perspektivi-yiyi-zastosuvannya> (дата звернення: 27.10.2025).
19. Mors R., Jonkers H. M. Bacteria-based self-healing concrete: Evaluation of full scale demonstrator projects. RILEM Technical Letters. 2019. Vol. 4. P. 138–144. DOI: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.93>.
20. Митко М. В., Шиліна О. П., Бурлака С. А. Сучасні методи газотермічного покриття в інноваційних технологіях для ремонту відновленням деталей автомобілів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. Вип. 6. С. 152–160. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-152-160>.
21. Перші 12 модульних мостів від проєкту Світового банку вже в Україні. Кабінет Міністрів України. 2024. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/pershi-12-modulnykh-mostiv-vid-proektu-svitovoho-banku-vzhe-v-ukraini> (дата звернення: 27.10.2025).
22. На Івано-Франківщині встановили новий модульний міст через річку Рибниця. Агентство відновлення. 2025. URL: <https://restoration.gov.ua/blog/na-ivano-frankivshyni-vstanovyly-novyy-modulnyj-mist-richku-rybnyczu> (дата звернення: 27.10.2025).
23. Перші 12 модульних мостів від проєкту Світового банку вже в Україні. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. 2024. URL: <https://mindev.gov.ua/news/35442-persi-12-modulnix-mostiv-vid-proektu-svitovoho-banku-vze-v-ukraini> (дата звернення: 27.10.2025).
24. Rebuilding Ukraine with a 3D Printed School. COBOD International. 2023. URL: <https://cobod.com/cobods-3d-construction-printing-technology-helps-to-rebuild-ukraine-first-project-is-a-3d-printed-school-in-lviv> (date of access: 27.10.2025).
25. Digital Twins: Enhancing Urban Resilience in War-Torn Ukraine. Bentley Blog. 2024. URL: <https://blog.bentley.com/insights/from-war-torn-ukraine-to-the-forefront-of-digital-twins-iryna-osadchas-courage-and-expertise-are-now-making-cities-more-resilient> (date of access: 27.10.2025).

Varyvoda Yu.Yu., Korchevskiy B.B., Didok V.Yu. INNOVATIVE METHODS FOR RESTORING CRITICAL INFRASTRUCTURE IN UKRAINE BASED ON ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES

The relevance of the study is determined by Ukraine's urgent need to develop scientifically sound approaches to restoring critical infrastructure after large-scale destruction caused by Russian military aggression. Reconstruction should be based not only on rapid restoration of functionality, but also on ensuring the durability, energy efficiency, and technological sustainability of structures. In this context, the introduction of modern materials and digital technologies is a decisive factor in increasing the reliability of engineering systems and the adaptability of infrastructure to future challenges.

The purpose of the article is to analyze innovative methods for restoring Ukraine's critical infrastructure based on the use of modern materials and digital technologies, taking into account the requirements of sustainability, energy efficiency, and safety.

The research methodology is based on systemic, structural-functional, and comparative-analytical approaches using expert assessment methods, technical-economic analysis, and life cycle modeling of engineering structures. To summarize the practice, cases of Ukrainian and international reconstruction projects were used, covering ultra-high performance concrete (UHPC), fiber-reinforced polymer (FRP), 3D printing, monitoring systems, and digital twins technologies.

The results of the study consist in identifying the structural components of the restoration process, systematizing the potential of modern materials and technologies, and justifying the advantages of digital integration in restoration processes. It has been proven that the use of UHPC, FRP reinforcement, self-healing cements, 3D printing technologies, and digital modeling contributes to a 30–50% increase in structural strength, a 40–60% reduction in reconstruction time, and a 25% reduction in operating costs.

The study emphasizes the need to transition to a normatively agreed and digitally integrated reconstruction system, within which innovative materials and technologies become the standard of state technical policy, rather than an exception to it. It has been established that effective restoration requires the unification of regulatory documents, the development of local production, and the creation of a single center for digital monitoring of critical infrastructure facilities.

Prospects for further research are related to the development of national standards for the certification of innovative materials, the introduction of artificial intelligence systems in the monitoring of structures, the creation of a national platform for digital twins, and the development of a new generation of educational programs for engineers and managers in the field of sustainable reconstruction.

Key words: reconstruction, sustainability, ultra-high-performance concrete, composite reinforcement, digital twins, structure monitoring, 3D printing, energy efficiency, life cycle, engineering modernization.

Дата надходження статті: 13.11.2025

Дата прийняття статті: 05.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

УДК 332.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/55>**Пілічева М.О.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ МАСОВОЇ ОЦІНКИ ЗЕМЕЛЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті розглядаються актуальні питання впровадження масової оцінки земель сільськогосподарського призначення в Україні в умовах трансформації земельних відносин, відкриття ринку земель та зростання ролі достовірної оціночної інформації. Наголошено на тому, що чинна система нормативної грошової оцінки, яка багато років використовувалася як базовий інструмент для оподаткування та регулювання земельних відносин, не відображає сучасних економічних умов, що призводить до суттєвих розбіжностей між номінальною та ринковою вартістю ділянок. Розкрито зміст та методичні засади пілотного проєкту масової оцінки земель, який передбачає інтеграцію просторових даних, інформації про транзакції та використання комплексних математичних моделей, зокрема гедонічної регресії, просторової інтерполяції та методів машинного навчання. Проаналізовано проблеми якості вихідних даних, що містяться у державних реєстрах, зокрема неповноту відомостей про угоди, розбіжності кадастрової інформації та нестачу атрибутивних характеристик. Визначено, що саме ці обмеження значною мірою впливають на точність масової оцінки та потребують системного вдосконалення інформаційної інфраструктури. Здійснено аналіз динаміки ринку земель сільськогосподарського призначення за 2021–2025 рр., що показав його адаптивність в умовах воєнних ризиків, а також зростання цін на землю в середньому на 15 % щорічно. Особливу увагу приділено регіональним відмінностям, формуванням яких визначально впливають геополітичні та безпекові фактори – зокрема, збільшення вартості у відносно безпечних регіонах та значне зниження активності на прифронтових територіях. Для більш глибокого аналізу зіставлено три види вартості – НГО, масову та ринкову – за даними щодо земель трьох областей (Київської, Львівської та Харківської). Результати демонструють суттєві диспропорції: від майже повної кореляції між НГО та масовою оцінкою у Харківській області до аномально завищеної масової вартості у Львівській. Показано, що НГО системно занижена у всіх регіонах і не може бути орієнтиром для сучасного ринку, тоді як масова оцінка потребує подальшої методичного калібрування та вдосконалення алгоритмів. Результати дослідження можуть слугувати основою для удосконалення підходів до оцінювання земель сільськогосподарського призначення та формування нової державної політики у сфері земельних відносин.

Ключові слова: земельна ділянка сільськогосподарського призначення, масова оцінка, нормативна грошова оцінка, ринкова вартість, цивільно-правова угода.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку земельних відносин в Україні постає нагальна потреба у формуванні об'єктивного та прозорого механізму оцінювання земель сільськогосподарського призначення. Існуюча система нормативної грошової оцінки (НГО), яка десятиліттями залишалася основою для визначення вартості земель та розрахунку податкових платежів, уже не відповідає реальним економічним умовам, динаміці ринку та сучасним вимогам управління земельними ресурсами. Значні відхилення між нормативною та рин-

ковою вартістю земель призводять до викривлення податкової бази, недоотримання доходів місцевими бюджетами та виникнення нерівних умов для суб'єктів господарювання.

Ситуація ускладнюється відкриттям ринку земель сільськогосподарського призначення, яке потребує достовірної, уніфікованої та регулярної оцінювальної інформації. Додатковим чинником, що загострює проблему, є воєнні дії та масштабні трансформації земельного фонду, включно з пошкодженням угідь, зміною структури земле-

користування та необхідністю об'єктивної фіксації наслідків руйнувань. У таких умовах традиційні методи оцінки виявляються недостатньо гнучкими та трудомісткими, тоді як масова оцінка, базована на сучасних геоінформаційних технологіях та автоматизованих моделях, здатна забезпечити своєчасне отримання достовірних даних.

Крім того, впровадження масової оцінки є важливою умовою гармонізації національного земельного законодавства з європейськими стандартами. Більшість країн ЄС використовують саме масовий підхід до оцінки земель як основу для податкових, реєстраційних та управлінських процедур. Для України це дозволить забезпечити порівнюваність оціночної інформації, посилити довіру до земельного ринку та створити конкурентне середовище для інвесторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні наукові та практичні дослідження щодо масової оцінки земель сільськогосподарського призначення в Україні набувають дедалі більшої ваги. Це зумовлено стратегічними реформами в земельній сфері, зокрема запуском пілотного проєкту масової оцінки [1], нормативно-правовими змінами та активною цифровізацією Державного земельного кадастру.

Українськими вченими проводяться дослідження в сфері інформаційного забезпечення масової системи оцінки земель. Так в науковій праці [2] визначають відповідність інформації, зазначеної в існуючих державних реєстрах та базах даних, вимогам, встановленим для автоматизованих систем масової оцінки нерухомості, згідно зі стандартами, прийнятими Міжнародною асоціацією оціночних інспекторів (IAAO) (International Association of Assessing Officers) та роблять висновок про достатність таких даних для проведення масової оцінки неоплішених земельних ділянок. Водночас автори висвітлюють проблему відсутності єдиної системи обміну інформацією, впровадження якої дозволило б використовувати існуючі відомості. Також досліджуються питання середньої ринкової вартості відносно НГО [3].

Дослідження закордонних вчених [4] направлені на вивчення питань вдосконалення проведення масової оцінки на базі стандартизованої LADM (Land Administration Domain Model), що забезпечує структуроване збереження атрибутів земельних ділянок, транзакцій і оцінок. Також уточнюються статистичні моделі оцінки – застосування багатофакторної регресії, штучних нейронних мереж [5-6].

Отже, узагальнення міжнародного досвіду свідчить про те, що ефективна система масової оцінки ґрунтується на поєднанні стандартизованих інформаційних моделей, повноцінних кадастрових даних та сучасних методів статистичного моделювання. Разом із тим, для України актуальним залишається питання адаптації цих підходів до національних умов, зокрема до специфіки ринку сільськогосподарських земель, структури державних реєстрів і чинної системи НГО. Саме тому важливим наступним кроком є розширення досліджень, спрямованих на порівняння ринкової вартості, визначеної під час масової оцінки, з показниками НГО, а також виявлення факторів, що зумовлюють їх розбіжності. Такі наукові напрацювання дозволять не лише підвищити точність моделювання, а й обґрунтувати можливі напрями модернізації національної системи оцінки земель.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження ринкової вартості, визначеної під час масової оцінки, для земель сільськогосподарського призначення.

Виклад основного матеріалу. Пілотний проєкт із впровадження масової оцінки земель, започаткований в Україні відповідно до Постанови [1], становить ключовий етап у трансформації національної системи оцінювання земельних ресурсів. Проєкт передбачає створення та тестування комплексної моделі масової оцінки земель, яка ґрунтується на інтеграції просторових даних, інформації про реальні транзакції та багатофакторних моделей вартості. Центральним елементом проєкту є формування геоінформаційної системи масової оцінки, що забезпечує накопичення, структурування та оброблення великомасштабних кадастрових та ринкових даних. Зокрема, було створено базу даних угод купівлі-продажу земельних ділянок, проведено аналіз атрибутивної інформації та здійснено їх класифікацію за подібними характеристиками на основі методів кластеризації [7].

Методична частина пілоту орієнтована на застосування сучасних математико-статистичних підходів, включно з гедонічними моделями, багатофакторною регресією, моделями машинного навчання та просторовою інтерполяцією. Такий інструментарій дозволяє прогнозувати ринкову вартість ділянок навіть за умов фрагментарності ринкових даних та неоднорідності земельного фонду.

Важливою складовою пілотного проєкту є оцінка якості та узгодженості вихідних даних, отриманих з різних державних реєстрів, а також

визначення можливостей їх інтеграції в єдиний інформаційний контур. Результати первинної апробації виявили низку проблемних аспектів – зокрема, неповноту реєстру транзакцій, розбіжності у просторових межах ділянок, нестачу детальної інформації про ґрунтові та інфраструктурні показники. Усе це актуалізує потребу в подальшому удосконаленні державних кадастрових та реєстраційних систем [3].

Для аналізу особливостей впровадження масової оцінки варто дослідити ринок земель сільськогосподарського призначення (СГП), який ведеться в Україні з 2021 р. За даними [8] станом на липень 2025 р. було укладено більше 300 000 угод про продаж земельних ділянок СГП загальною площею близько 636 000 га. На рисунку 1 відображений розподіл кількості угод та площі проданих земель по роках.

Дані рисунку 1 визначають різкий спад кількості угод (26 %) і площі земельних ділянок (45 %) у 2022 р. порівняно з 2021 р., що викликано початком військової агресії РФ проти України і, як наслідок, відбулося блокування державних реєстрів і кадастрів до травня 2022 р., частина сільськогосподарських угідь опинилася під окупацією або опинилася в зоні бойових дій, сформувався екстремальний рівень невизначеності та ризиків для інвесторів та продавців. У 2023 і 2024 рр. проглядається значне зростання кількості угод (відповідно 57 % і 42 %) і площ земель (245 % і 72 %), що викликано адаптацією до воєнних дій, відбулося часткове відновлення роботи реєстрів та кадастрів. Також, на тлі інфляції та девальвації гривні земля розглядається як надійний інвестиційний актив (захисний актив), що не знецінюється і є «фізичним». Тенденція зростання кількості угод і площі проданих земель у 2025 р. спостерігається, бо враховані дані на 01.07.2025 р.

Динаміка середньої ціни 1 га землі за 2021–2025 роки відображає високу мінливість та стійкість ринку [9]:

1. Незважаючи на різке падіння обсягів угод у 2022 р. через військовий шок, ціна 1 га землі зросла з 35 389,61 грн (2021 р.) до 41 637,08 грн (2022 р.), що становить зростання на 18 %. Це зростання пояснюється самофільтрацією ризику (угоди уклалися в безпечніших регіонах) та інфляційним тиском.

2. Після невеликої корекції у 2023 р. до 40 077,32 грн, ціна збільшилася у 2024 р. до 47 822,34 грн, і у 2025 р. до 61 091,76 грн, досягнувши найвищого річного зростання +28 %. Ця експансія є прямим наслідком допуску юридичних осіб до ринку з 2024 року, що спричинило значне зростання попиту та забезпечило середньорічний темп зростання на рівні 15 % за весь період.

Динаміка ринку земель у 2025 р. характеризується посиленням регіональної диференціації цін та обсягів угод, що обумовлено нерівномірним впливом військових ризиків та інвестиційною привабливістю. Регіони, що розташовані на Заході та в Центрі України (зокрема, Київська, Тернопільська, Львівська і Івано-Франківська області) є лідерами за обсягом угод та ціною (досягаючи 123 949,98 грн/га) завдяки їхній відносній безпеці та високій якості ґрунтів. Натомість, прифронтові та південно-східні області (Сумська, Харківська, Запорізька, Херсонська) продовжать демонструвати найнижчу ліквідність та ціни, оскільки основні гравці ринку, особливо юридичні особи, мінімізують ризики, фокусуючись на безпечніших активах після відкриття ринку для компаній у 2024 р.

Для здійснення дослідження та проведення аналізу вартості земельних ділянок, отриманої за результатами масової оцінки, обрано два

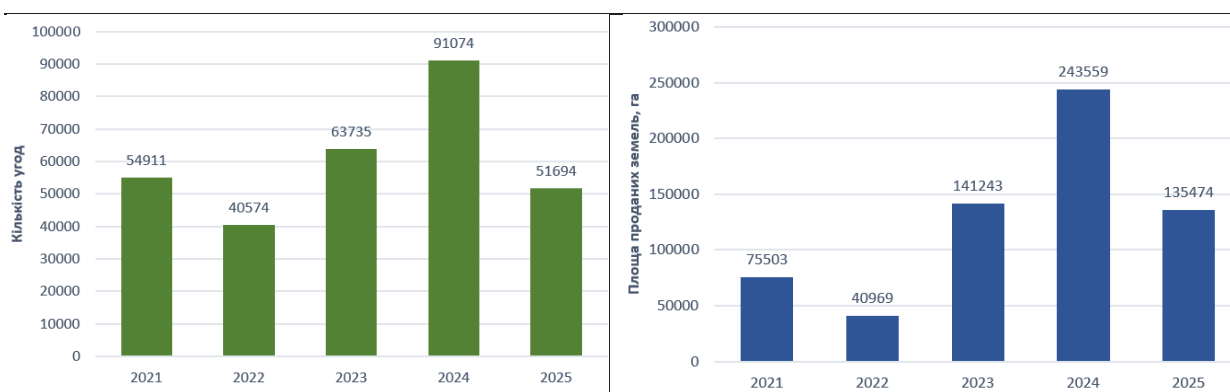


Рис. 1. Кількісні показники щодо продажу земельних ділянок СГП станом на 01.07.2025 р.

види цільового призначення земель СГП – 01.01 для ведення товарного сільськогосподарського виробництва і 01.02 для ведення фермерського господарства. Земельні ділянки розташовані во Львівській, Київській та Харківській областях. Всього було проаналізовано 48 земельних ділянок (по 16 в кожній області). Для дослідження розраховано значення середньої НГО і середньої вартості масової оцінки досліджуваних земельних ділянок, а також середня ринкова вартість земель СГП у відповідній області, які відображаються на сайті Держгеокадастру в розділі «Моніторинг земельних відносин» [9] станом на 01.07.2025 р. За результатами аналізу зазначених величин побудовано діаграму (рис. 2).

Для Харківської, Київської та Львівської областей демонструються значні регіональні відмінності у результатах оцінки та реальних ринкових цінах на землю. Ключовою особливістю є диспропорція між середніми НГО, масовою оцінкою та середньою ринковою ціною.

У Харківській області НГО та масова оцінка є надзвичайно близькими (30 068 грн/га проти 29 983 грн/га), що свідчить про високу кореляцію між цими адміністративними методами. Однак, обидві оцінки істотно занижені порівняно з реальною середньою ринковою ціною (43 653 грн/га), становлячи лише близько 69 % від ринкової вартості.

Київська область демонструє найбільший розрив між НГО та іншими показниками. Середня НГО (23 556 грн/га) є найнижчою серед трьох областей, але при цьому середня ринкова ціна

(80 686 грн/га) є найвищою. Масова оцінка (52 766 грн/га) значно вища за НГО, але становить лише близько 65 % від ринкової ціни. Висока ринкова вартість обумовлена ефектом близькості до столиці та розвинутою інфраструктурою.

Львівська область представляє унікальну ситуацію. НГО (15 979 грн/га) є найнижчою серед усіх трьох областей. Проте Масова оцінка (141 520 грн/га) більш ніж удвічі перевищує найвищу ринкову ціну (80 686 грн/га у Київській обл.) і майже вдвічі перевищує власну середню ринкову ціну (74 302 грн/га).

Значне зростання ринкової вартості землі у Київській та Львівській областях є частково обумовлено геополітичними факторами та диференціацією ризиків. Зокрема, нижчий військовий ризик Львівської області (завдяки її географічній віддаленості від лінії фронту) спричинив підвищення інвестиційного попиту.

Висновки. У даному дослідженні визначено основні особливості впровадження масової оцінки земель СГП в Україні, а саме:

1. Пілотний проєкт впровадження масової оцінки земель в Україні ґрунтується на сучасних математичних та просторово-аналітичних підходах, що поєднують ГІС-технології, автоматизовану обробку великих даних та інструменти машинного навчання. Головною його метою є формування об'єктивної та прозорої системи визначення ринкової вартості земельних ділянок, здатної забезпечувати надійні прогнози навіть за умов високої волатильності та нестабільності земельного ринку.

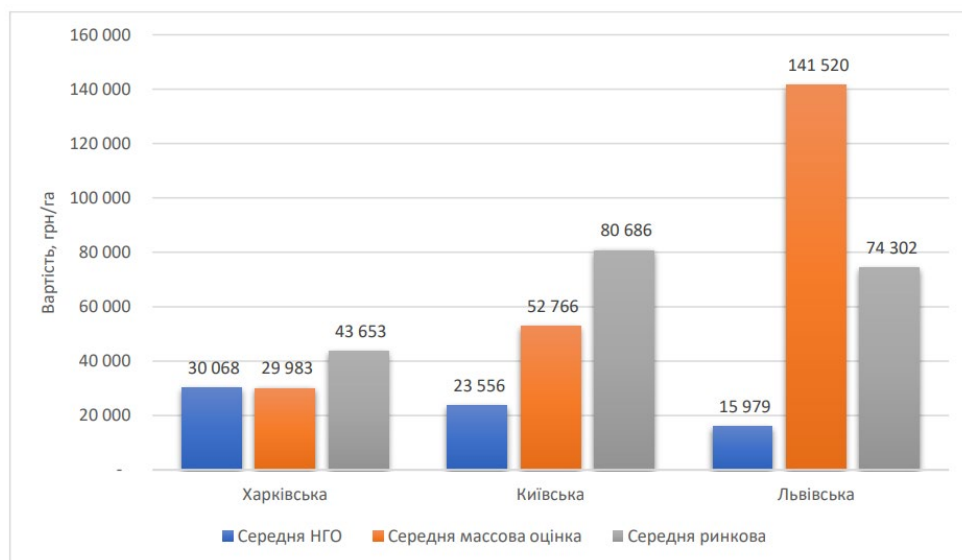


Рис. 2. Порівняння середніх значень НГО, вартості масової оцінки і середньої ринкової вартості по областям

2. Було виявлено низку системних обмежень, пов'язаних із якістю вихідних даних. Найсуттєвішими проблемами стали неповнота реєстру транзакцій, фрагментарність відомостей про угоди, а також неспівставність просторової інформації між державними реєстрами. Подібні недоліки значно ускладнюють побудову точних моделей оцінки та знижують загальну достовірність розрахунків.

3. Попри наявні труднощі, ринок земель сільськогосподарського призначення у 2021–2025 роках продемонстрував стійкість, адаптивність та відчутну динамічність. Після різкого падіння кількості угод у 2022 році, спричиненого повномасштабною війною, уже у наступні роки спостерігалось активне відновлення ринкової активності. Земля стала для інвесторів відносно надійним активом в умовах воєнної невизначеності, що сприяло стабільному зростанню середньої ціни – у середньому на 15 % щороку. Додатковий вплив мало відкриття ринку для юридичних осіб у 2024 році, що стимулювало попит і спричинило суттєве зростання вартості.

4. Порівняльний аналіз показав суттєвий дисбаланс між різними видами оцінки. НГО, яка досі використовується у регуляторних і фінансальних

механізмах, значно відстає від реальних ринкових показників і фактично не відображає сучасної економічної ситуації. Масова оцінка, навпаки, покликана наблизити оціночні значення до ринку, проте її результати виявляються неоднорідними: у Харківській області простежується майже повна кореляція з НГО, а у Львівській – моделі демонструють аномально завищену вартість порівняно з фактичними ринковими угодами.

5. Ключовими чинниками ціноутворення на землі стають не стільки просторові характеристики – такі як відстань до доріг чи адміністративних центрів, – скільки геополітичні та безпекові. Області з нижчими воєнними ризиками, зокрема Львівська та Київська, отримують виражене збільшення вартості, тоді як регіони, що зазнали воєнного навантаження, демонструють стриманіший розвиток ринку.

Отже, масова оцінка земель є перспективним інструментом модернізації державної земельної політики, проте її ефективність безпосередньо залежить від повноти та якості вихідних даних. Подальший успіх цієї реформи вимагатиме комплексного вдосконалення державних реєстрів, стандартизації просторової інформації та підвищення прозорості земельних транзакцій.

Список літератури:

1. Деякі питання реалізації пілотного проекту щодо проведення масової оцінки земель : Постанова Кабінету Міністрів України від 13.10.2023 р. № 1078. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1078-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення: 17.11.2025).
2. Kuryltsiv R., Myronov O. Analysis of information support in the context of establishing a mass appraisal system for land in Ukraine. *Geodesy, cartography and aerial photography*. 2024. Issue 99. P. 45–56. DOI <https://doi.org/10.23939/istecap2024.99.038>
3. Deininger K., Ali D., Bukin M., Martyn R. Transition from Normative to Market-Based Mass Valuation of Agricultural Lands in Ukraine. Rome : FAO, 2024. 72 p.
4. Buuveibaatar, D., Lee, S., Lee, J. Valuation Information Model for Mass Appraisal based on LADM: Case of Mongolia. *Land*. 2023. Vol. 12(4). 893. DOI <https://doi.org/10.3390/land12040893>
5. Karataş, M., Karaduman, H. Application of MRA and ANN for mass appraisal of agricultural lands outside zoning plans in Turkey. *Turkish Journal of Geosciences*. 2023. Vol. 35(8). P. 761–775. DOI <https://doi.org/10.48053/turkgeo.1213142>
6. Srebalová, L., Srebala, M. Agricultural land valuation in the context of land consolidation in Slovakia. *Administrative Sciences*. 2022. Vol. 12(4). 174. DOI <https://doi.org/10.3390/admsci12040174>
7. Публічний звіт Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру за 2024 р. URL: https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2025/03/publichnyj-zvit_2024.pdf
8. The price of land per hectare has increased by 60% since the launch of the land market. URL: <https://opendatabot.ua/en/analytics/land-2025>
9. Моніторинг ринку земель. URL: <https://land.gov.ua/monitorynh-zemelnykh-vidnosyn/>

Pilicheva M.O. FEATURES OF IMPLEMENTATION OF MASS APPRAISAL OF AGRICULTURAL LAND

The article addresses topical issues regarding the implementation of mass appraisal of agricultural land in Ukraine amidst the transformation of land relations, the opening of the land market, and the growing role of reliable appraisal information. It is emphasized that the current system of normative monetary valuation (NMV), which has been used for many years as the basic tool for taxation and regulation of land relations, does not reflect modern economic conditions, leading to significant discrepancies between the nominal and

market values of land plots. The content and methodological foundations of the pilot project for mass land appraisal are revealed, which involves the integration of spatial data, transaction information, and the use of complex mathematical models, including hedonic regression, spatial interpolation, and machine learning methods. The study analyzes the problems concerning the quality of source data contained in state registers, particularly the incompleteness of transaction records, inconsistencies in cadastral information, and the lack of attributive characteristics. It is determined that these limitations significantly impact the accuracy of mass appraisal and necessitate the systematic improvement of the information infrastructure. An analysis of the dynamics of the agricultural land market for 2021–2025 was conducted, which showed its adaptability in the face of military risks, as well as an average annual land price increase of 15%. Particular attention is paid to regional differences, which are decisively influenced by geopolitical and security factors—specifically, the increase in value in relatively safe regions and a significant decrease in activity in front-line territories. For a deeper analysis, three types of value—NMV, mass appraisal, and market price—were compared using land data from three regions (Kyiv, Lviv, and Kharkiv). The results demonstrate significant disparities: ranging from an almost complete correlation between NMV and mass appraisal in the Kharkiv region to an anomalously overstated mass value in the Lviv region. It is shown that NMV is systematically undervalued across all regions and cannot serve as a benchmark for the modern market, while mass appraisal requires further methodological calibration and algorithm refinement. The research findings can serve as a basis for improving approaches to the appraisal of agricultural land and shaping new state policy in the field of land relations.

Key words: agricultural land plot, mass appraisal, normative monetary valuation, market value, civil law transaction.

Дата надходження статті: 18.11.2025

Дата прийняття статті: 05.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.372

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/56>**Гребінь О.П.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Левенець Н.Ф.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Трапезон К.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тронь І.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОРІВНЯННЯ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИГНАЛІВ В КОНТЕКСТІ РОБОТИ ЗВУКОРЕЖИСЕРА

В роботі проаналізовано основні параметри мікрофонів та дана оцінка їх числових значень, зокрема що стосується електричних параметрів та електроакустичних характеристик останніх. До таких параметрів віднесено чутливість мікрофону, його внутрішній опір, частотний діапазон, діаграма спрямованості, тощо. Проте зазначені параметри, як це випливає з практичного досвіду, не в повному обсязі характеризують практичні характеристики пристрою і не у повному обсязі розкривають можливості мікрофона для професійної діяльності. Визначено параметри, які можна розрахувати, як доповнення до основних параметрів при різних практичних умовах застосування мікрофонів. Більше того, при практичному застосуванні мікрофонів завжди існує необхідність співставлення акустичних параметрів сигналів натурального звучання, які надходять на мікрофон, як за прямим параметром, так і за рівнем цього параметра, з відповідними параметрами електроакустичних перетворювачів мікрофонів.

Розглянуто математичні розрахунки параметрів мікрофонів, і результати яких можуть бути використані фахівцями в якості підґрунтя для подальшого вибору мікрофонів для їх практичного застосування, наприклад, в студіях звукозапису.

Для підтвердження практичного застосування розрахункових параметрів в статті наведено аналіз параметрів мікрофонів студійного призначення та проведено розрахунки додаткових практичних параметрів для моделей мікрофонів фірм AKG, Neumann та Shure. Знайдено, що серед обраних для аналізу мікрофонів за акустичними параметрами кращим вибором може бути мікрофон KSM44A (Shure). За електричними параметрами кращим мікрофоном можна назвати TLM193 (Neumann). За електроакустичними параметрами встановлено, що мікрофон TLM193 (Neumann) є умовно «золотою» серединою за параметрами. Разом з тим, мікрофон C314 (AKG) забезпечує краще звучання для вокалу, окремих інструментів у запису, а мікрофон KSM44A (Shure) ідеально підходить до загальнопланового, поверхневого запису сигналів. Мікрофон TLM193 (Neumann) є кращим серед розглянутих для більш чіткого передавання сигналів.

Ключові слова: перетворювач, чутливість, мікрофон, опір, звуковий тиск, частотна характеристика, акустичний сигнал.

Постановка проблеми. Робота звукорежисера пов'язана із аналізом та обробленням різноманітних джерел звуку, які оцінюються на основі різних акустичних параметрів. До того ж, при використанні пристроїв оброблення сигналів, в студійних умовах, слід враховувати обов'язково і електронні джерела звуку, які характеризуються відповідними електричними параметрами звукового сигналу. Перетворення звукових акустичних сигналів в електричні і навпаки, забезпечують, як відомо, електроакустичні перетворювачі – мікрофони та гучномовці. Кожний такий електронний пристрій характеризується відповідними технічними параметрами, які визначають якісні показники отриманого кінцевого звукового контенту.

Мікрофон – електроакустичний перетворювач, який призначений для перетворення акустичних коливань повітряного середовища в електричний сигнал. Якщо в повній мірі оцінювати перетворення мікрофона, то він являє собою за принципом дії акусто-механо-електричний перетворювач. Серед основних параметрів мікрофонів, що є важливими при роботі звукорежисера можна виділити чутливість, частотний діапазон, внутрішній опір, коефіцієнт гармонічних спотворень, рівень власних завад, діаграма спрямованості. Крім цього, одним з основних параметрів мікрофону, наприклад для студійного запису, можна вважати звуковий тиск або рівень звукового тиску, що надходить на мікрофон. Натомість, зазначені вище параметри характеризують лише стандартні характеристики мікрофонів, і переважно дають можливість в цілому порівнювати мікрофони між собою, однак не в повному обсязі дозволяють визначити їх практичні (робочі) характеристики. Так параметри, що зазначають виробники електронного акустичного обладнання, до якого можна віднести мікрофони, не завжди повно розкривають практичні можливості та особливості цих акустичних пристроїв. Наприклад, який рівень вихідної напруги буде мати мікрофон якщо на нього буде діяти акустичний сигнал із звуковим тиском 10 Па, або, який звуковий тиск необхідно подати на мікрофон, щоб отримати рівень електричного сигналу 0 дБ, або, який рівень сигналу буде на виході мікрофона, що встановлений на відстані, наприклад, 5 метрів від джерела з визначеною інтенсивністю звуку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електроакустичні перетворювачі до яких відносять і мікрофони, знаходять широке використання в різних сферах та напрямках сучасної науки і техніки.

В роботі [1] наведено підхід до поліпшення якості мовних сигналів в системі активних звукоізолюючих навушників, заснований на використанні масиву мікрофонів. Так масив мікрофонів захоплює мовні сигнали, змішані з цільовим шумом, і вони обробляються синхронно за допомогою вдосконаленого методу оцінки затримки узагальненої крос-кореляції (GCC), що включає спектральне віднімання сигналів.

В статті [2] мікрофон використовується для оцінки шуму, який створюється внаслідок вібрації між обробним інструментом та заготовкою і такий аналіз проведено авторами роботи з використанням інструментів машинного навчання. Більше того, мікрофон в даному випадку виступає, як вимірювальний елемент реєстрації акустичних сигналів на етапі фрезерування деталі. На відміну від цього, дослідження в роботі [3] розглянуто MEMS-мікрофони в якості мікрофонів тиску для вимірювання коливань тиску на стінці в профільному елементі 30P30N.

Постановка завдання. Метою статті є експериментальна оцінка розрахункових співвідношень для визначення основних технічних параметрів трьох обраних моделей мікрофонів з подальшим проведенням їх порівняльного аналізу для практичного застосування в студіях аудіо- та звукозапису.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- визначення та класифікація основних технічних параметрів мікрофонів з розподілом їх на окремі групи;
- на основі розрахованих технічних параметрів проведення порівняльного аналізу мікрофонів;
- аналіз частотних характеристик та діаграм спрямованості для обраних трьох різних видів мікрофонів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Мікрофон за принципом функціонування є електроакустичним перетворювачем [4], і його технічні параметри можна умовно поділити на три групи за параметрами – електроакустичні параметри, акустичні параметри та електричні параметри. Такий поділ більш детально пояснює, яку характеристику більше визначає даний параметр – акустичну чи електричну. Зазвичай, у специфікації на мікрофон такого розділення не передбачено.

Електроакустичні параметри відображають взаємозв'язок між акустичними параметрами, що характеризуються параметрами звуку і його розповсюдженням у повітряному середовищі, та електричними параметрами, які визначають електричні «еквіваленти» (представлення) акустичних

параметрів. До цих параметрів відноситься чутливість, номінальний діапазон частот, частотна характеристика та її нерівномірність, рівень власних завад, динамічний діапазон.

Електричні параметри характеризують мікрофон з точки зору визначення електричних складових або електричних параметрів, приведених до акустичного параметра без урахування самого акустичного параметра, і саме ці параметри виражаються через напругу, опір, струм, потужність, а також дозволяють оцінити особливості включення мікрофона в електричні кола. До цих параметрів також можна віднести внутрішній опір мікрофона, повний коефіцієнт гармонічних спотворень.

Акустичні параметри відображають параметри мікрофона щодо його акустичних умов та акустичних параметрів сигналу, а саме, сприйняття мікрофоном акустичних сигналів. До цих параметрів відносять рівень максимального звукового тиску та характеристику або діаграму спрямованості.

Вимоги до параметрів мікрофонів та методи їх вимірювання зазначено у міжнародних стандартах IEC 60268 ч. 1, 4, 22 [5, 6, 7], IEC 60581 [8], IEC 61094 ч. 1, 4, 8 [9, 10, 11], IEC 61842 [12], тощо. Разом з тим, в міжнародних стандартах нормують тільки методи вимірювань, а параметри визначає сама фірма-виробник акустичного обладнання. В специфікаціях на мікрофони виробники зазвичай зазначають конструктивні особливості мікрофонів, зокрема, тип мікрофона (конденсаторний, динамічний, тощо), розміри, тип перетворювача (приймач тиску чи градієнта тиску, або комбінований); електричні параметри перетворювача, наприклад, напругу «фантомного» живлення для конденсаторних мікрофонів [13].

Чутливість мікрофона – параметр, який в першу чергу аналізується при визначенні якісних характеристик мікрофона. Чутливість мікрофона E визначається через напругу на виході мікрофона $U_{\text{вих}}$ при підведенні до нього деякого значення звукового тиску $p_{\text{зв}}$:

$$E = U / p_{\text{зв}}, \text{ мВ/Па.} \quad (1)$$

В деяких популярних виданнях, наприклад в [13], чутливість визначають як параметр, який показує мінімальний рівень звуку, що приймає мікрофон. Але це не зовсім так. Щоб мікрофони можна було порівнювати між собою запроваджуються стандартні умови вимірювання чутливості і, відповідно, значення звукового тиску, при якому визначається чутливість. Зазвичай, при зазначенні чутливості мікрофона наводять рівень чутливості – чутливість, яка виражена в децибелах

щодо величини 1 В/Па. Чутливість та рівень чутливості за своїм основним визначенням зазначає взаємозв'язок між акустичним параметром звукового сигналу (звуковий тиск) та електричним параметром – напругою. Чим більше значення чутливості мікрофона, тим він більш чутливий щодо тихих звуків і, відповідно, якісніший для певних умов застосування.

Враховуючи, що мікрофон є елементом електричного кола, що має власний імпеданс і є, по суті, генератором електричних сигналів, то при проходженні через нього електричного струму в ньому генеруються сигнали, які спричинені тепловими шумами в електричній частині мікрофона, а також флуктуаціями частинок в навколишньому середовищі, навіть за відсутності будь-якого акустичного сигналу поблизу мікрофона, і це у свою чергу, призводить до появи напруги на виході мікрофона. Цю напругу розглядають як напругу власних шумів мікрофона. Хоча рівень власних шумів характеризує електричну складову мікрофона, який є компонентом електричного кола, його частіше співставляють з акустичним сигналом, який би створював напругу на виході мікрофона, що відповідає електричному рівню шуму.

Напругу шумів мікрофона можна визначити як рівень напруги власних шумів яку на практиці приводять до рівня акустичного сигналу (рівня звукового тиску), який би створював саме такий рівень напруги при відсутності вхідного звукового сигналу. Способи вимірювання рівня власних шумів мікрофонів дещо відрізняються в різних стандартах, тому зазвичай в сучасних каталогах наводяться два значення еквівалентного рівня шумів: за стандартом DIN 45412 (IEC 651) і за стандартом DIN 45405 (CCIR 468-2). Для першого випадку у вимірюваннях застосовують фільтр, який обмежує частотний діапазон відповідно зваженої стандартної кривої А (рис. 1), яка відповідає характеристиці сприйняття людиною звукових сигналів із середнім рівнем гучності. У другому випадку використовують криву С, яка має більш широкий частотний діапазон і відповідає більш гучнішому сигналу, що сприймає людина. Рівень шуму при вимірюванні із шкалою С буде більшим чим при вимірюванні із застосуванням шкали А.

Наприклад, в студійних конденсаторних мікрофонів власний рівень шуму $L_{\text{ш}}$ може знаходитись в межах $L_{\text{шА}}=10-20$ дБА (IEC651) або $L_{\text{шС}}=20-30$ дБС (CCIR 468-3).

Для визначення власних шумів мікрофонів співвідношення «сигнал/шум» теж обчислюють двома способами:

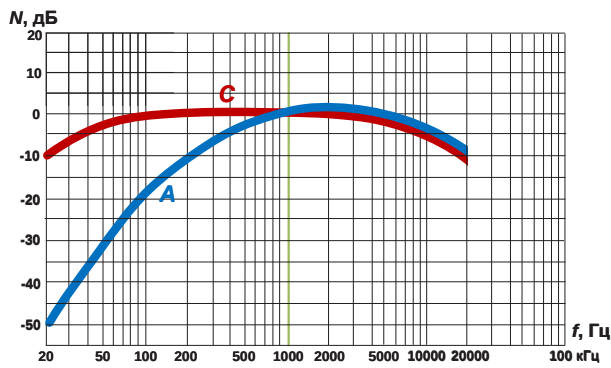


Рис. 1. Смути пропускання вагових фільтрів А та С в звуковому діапазоні для визначення рівнів власних шумів мікрофонів

– S/N ratio (DIN / IEC651) – співвідношення «сигнал/шум», що обчислюється як різниця між опорним рівнем звукового тиску 94 дБ (1 Па) і еквівалентним рівнем шуму, вимірним за IEC 651;

– S/N ratio (CCIR 468-2) – співвідношення «сигнал/шум», яке обчислюється як різниця між рівнем 94 дБ і еквівалентним рівнем шуму, вимірним за CCIR 468-2.

Наприклад, для студійних конденсаторних мікрофонів ці величини знаходяться в межах:

$$S / N_{ratio\ IEC651} = L_1 - L_{w(A)} = 94 - L_{w(A)} = 74...84\ \text{дБ-А};$$

$$S / N_{ratio\ CCIR468-2} = L_1 - L_{w(C)} = 94 - L_{w(C)} = 64...74\ \text{дБ}.$$

Серед параметрів, які важливі в роботі звуко-режисера, і що зазвичай не зазначають в паспортних даних на мікрофон, можна зазначити такі: рівень чутливості (при відсутності у специфікації та наведення у паспортних даних лише значення чутливості), стандартний рівень чутливості при номінальному навантаженні та навантаженні, що відповідає вхідному опору мікрофонного підсилювача мікшерного пульта, напруга або рівень напруги при відповідному значенні звукового тиску, напруга або рівень напруги при розташуванні мікрофона на зазначеній відстані, динамічний діапазон, відношення сигнал/шум, нерівномірність частотної характеристики, числові значення чутливості при розташуванні мікрофона під кутом до джерела, максимальна напруга або рівень напруги при визначених спотвореннях, звуковий тиск, який необхідно підвести до мікрофона, щоб отримати рівень електричного сигналу N_m на виході мікрофона, наприклад, $N_m = 0$ дБ, звуковий тиск $p_{зв\ гр}$ при граничному рівні сигналу, рівень звукового електричного сигналу на виході мікрофона при підведенні акустичного сигналу, що відповідає максимальному рівню звукового тиску, відпо-

відність електричного рівня на виході мікрофона акустичному рівню на вході мікрофона.

Стандартний рівень чутливості враховує електричну складову чутливості, тобто електричні параметри – опір навантаження, напруга на відповідному навантаженні, стандартна потужність, що виділяється на навантаженні. В технічних параметрах, зазвичай, стандартний рівень чутливості не наводиться, але за необхідністю можна встановити рівень напруги на виході мікрофона при відповідному навантаженні, що є важливим при узгодженні мікрофона з вхідними колами мікрофонного підсилювача.

Напругу та рівень напруги на виході мікрофона при відповідних значеннях рівня акустичного сигналу (рівня звукового тиску) на відстані 1 м з урахуванням паспортної чутливості мікрофона, тобто відповідність рівня акустичного сигналу електричному рівню, можна знайти за формулами:

$$U = 0,775 \cdot 10^{0,05 N_u}, \text{ В};$$

$$N_u = 20 \lg \frac{U}{U_0} = 20 \lg \frac{E_{oc} \cdot p_m}{U_0} = 20 \lg \frac{E_{oc} \cdot p_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}}{0,775} = 20 \lg \frac{E_{oc} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}}{0,775} =$$

$$= 20 \lg (2,58 \cdot 10^{-5} E_{oc} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}) \approx -92 + 20 \lg (E_{oc} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}), \text{ дБн}.$$

де N_m – рівень електричного сигналу на виході мікрофона; E_{oc} – осьова чутливість мікрофона; $p_{зв}$ – звуковий тиск; p_0 – звуковий тиск, що відповідає порогу чутності та нормоване значення звукового тиску відносно якого визначають рівень акустичного сигналу; L_p – рівень акустичного сигналу за звуковим тиском.

Для порівняння паспортних параметрів та розрахованих додаткових параметрів у табл. 1 наведено параметри трьох мікрофонів різних виробників – AKG, модель C314, Neumann – TLM193, Shure – KSM44A. Загальний вигляд цих мікрофонів наведено на рис. 2. Параметри мікрофонів взято з офіційних сайтів AKG – C314 [14], Neumann – TLM193 [15], Shure – KSM44A [16]. Наприклад, якщо мікрофон має чутливість 20 мВ/Па (AKG C314), то при звуковому тиску в 1 Па на його виході буде напруга 20 мВ, виходячи зі співвідношення (1). Відповідно, для мікрофона Neumann TLM193 при звуковому тиску в 1 Па на його виході буде напруга 18 мВ, а для Shure KSM44A – 28 мВ.

Якщо мікрофон має чутливість 1 мВ/Па, що характерно для динамічних мікрофонів, то при підведенні до нього сигналу з акустичним рівнем 40 дБ (0,002 Па), напруга на його виході буде становити 0,002 мВ, а рівень, приблизно, -112 дБ, що є менше власного рівня шуму окремих підсилювачів, і такий сигнал не буде визначатись як корисний від мікрофона.

Розраховані технічні параметри мікрофонів

Технічні параметри мікрофонів	C314, AKG	TLM193, Neumann	KSM44A, Shure
Рівень чутливості при навантаженні, що відповідає вхідному опорі мікрофонного підсилювача, наприклад, 2,2 кОм, дБн	-36,3	-38,3	-34,5
Рівень електричного сигналу N_m на виході мікрофона при визначеному звуковому тиску на відстані 1 м від джерела при звуковому тиску $p_{зв}=20$ Па, дБн	-5,7	-6,7	-2,8
Рівень електричного сигналу на виході мікрофона при звуковому тиску, наприклад, $p_{зв,дж}=100$ Па на відстані 20 м від джерела, що має сферичний фронт звукової хвилі, дБн	-17,8	-18,7	-15
Рівень електричного сигналу на виході мікрофона при звуковому тиску, наприклад, $p_{зв,дж}=10$ Па на відстані 10 см від джерела, що має сферичний фронт звукової хвилі, дБн	8,2	7,3	11,2
Напруга на виході мікрофона при звуковому тиску, наприклад, $p_{зв,дж}=10$ Па на відстані 10 см від джерела, що має сферичний фронт звукової хвилі, В	2	1,8	2,8
Звуковий тиск при рівні електричного сигналу на виході мікрофона $N_m=0$ дБ $p_{зв,0дБ}$, Па	38,75	43,06	27,7
Звуковий тиск при граничному рівні сигналу $p_{зв,гр,2}$, Па	112,5	200	200
Стандартний рівень чутливості при $R_{ном}=R_i$	-27	-22	-18
Динамічний діапазон D , дБ	127	130	136 (127)
Нерівномірність частотної характеристики	± 5 дБ	+2/-5 дБ	+3/-5 дБ
Діапазон частот при нерівномірності ± 3 дБ (-3 дБ)	20...6000 Гц	30...20000 Гц	20...18000 Гц
Перепад чутливості "фронт / тил" на частоті 1000 Гц, дБ	-17	менше, -23	менше, -25



а)

б)

в)

Рис. 2. Загальний вигляд мікрофонів C314 (AKG) (а), TLM193 (Neumann) (б) та KSM44A (Shure) (в)

Порівняння мікрофонів за технічними параметрами можна провести при включеній діаграмі спрямованості мікрофонів C314 (AKG) та KSM44A (Shure) в режимі кардіоїди. Обрані мікрофони, згідно даних таблиці 1 мають порівняно однакові параметри з невеликою різницею у значеннях. За чутливістю, порівнюючи наведені мікрофони найкращу чутливість має мікрофон KSM44A (Shure). Разом з тим, при достатньо гучних сигналах, або при наближенні цього мікрофона до джерела, вихідний рівень буде більше ніж у інших мікрофонів, і це може призвести до появи спотворень у сигналі, або сприйнятті сторонніх звуків, шумів, появи акустичного зворотного зв'язку у системах звукопідсилення, тощо. Врахо-

вуючи ці обставини мікрофон TLM193 (Neumann) може бути кращим варіантом серед обраних. Щодо узгодження за опором «імпеданс-вхідний опір підсилювача» найгіршим варіантом є мікрофон C314 (AKG), оскільки TLM193 (Neumann) та KSM44A (Shure) мають однаковий імпеданс. За рівнем власних шумів найкращим вибором буде мікрофон KSM44A (Shure), динамічний діапазон якого також достатньо великий.

За частотним діапазоном, відповідно специфікаціям, всі мікрофони мають однаковий частотний діапазон, але враховуючи найменшу нерівномірність у зазначеному діапазоні найкращим є мікрофон TLM193 (Neumann), і до речі, з нерівномірністю ± 3 дБ схожий діапазон мають мікрофони TLM193 (Neumann) та KSM44A (Shure). Крім цього мікрофон TLM193 (Neumann) забезпечує більше ВЧ (до 20 кГц), у той час коли мікрофон KSM44A (Shure) забезпечує більше НЧ (до 20 Гц).

За формою частотної характеристики можна зазначити, що мікрофон C314 (AKG) дещо «підкреслює» сигнали у діапазоні 300...600 Гц (підсилення до +3 дБ), підсилює сигнали до +5 дБ у діапазоні 6...12 кГц, та приглушує сигнали у діапазоні 1...3 кГц (у межах -3 дБ), а також вище 15 кГц (до -5 дБ).

Для мікрофона TLM193 (Neumann), який характеризується незначною нелінійністю коливань в області ВЧ (3...20 кГц) в межах ± 2 дБ

і невеликим спаданням до -5 дБ нижче 40 Гц, що практично не впливає на характеристику звуку після перетворення.

Мікрофон KSM44A (Shure) має ідеальну лінійність для НЧ сигналів в області частот до 3 кГц (нелінійність практично 0 дБ), «підкреслює» сигнали у діапазоні 3...12 кГц (підсилення до +2...3 дБ) та приглушує сигнали вище 16 кГц на 3...5 дБ. На рисунку 3 наведено отримані частотні характеристики та діаграми спрямованості мікрофонів: C314 (AKG) у режимі діаграми спрямованості кардіоїда та без включеного фільтра; TLM193 (Neumann); KSM44A, Shure у режимі діаграми спрямованості кардіоїда.

Аналіз отриманих діаграм спрямованості для кардіоїдної форми діаграми спрямованості пока-

зав, що рівень сигналу на виході мікрофона C314 (AKG) при розташуванні джерела на відстані 1 м від мікрофона та під кутом 90°, на частоті 1 кГц становитиме -3 дБ відносно рівня на осі, незалежно від початкового рівня акустичного сигналу (рис. 3, а). Під кутом 180°, тобто, з тильної сторони на тій же частоті рівень буде становити -17 дБ відносно рівня на осі. На частоті, наприклад, 16 кГц рівень сигналу на виході мікрофона під кутом 90° становитиме -30 дБ відносно рівня на осі, а з тильної сторони на тій же частоті буде становити теж -15 дБ.

Для мікрофона TLM193 (Neumann), відповідно діаграми спрямованості, рівень сигналу на виході мікрофона при розташуванні джерела на відстані 1 м від мікрофона й під кутом 90°, на частоті 1 кГц

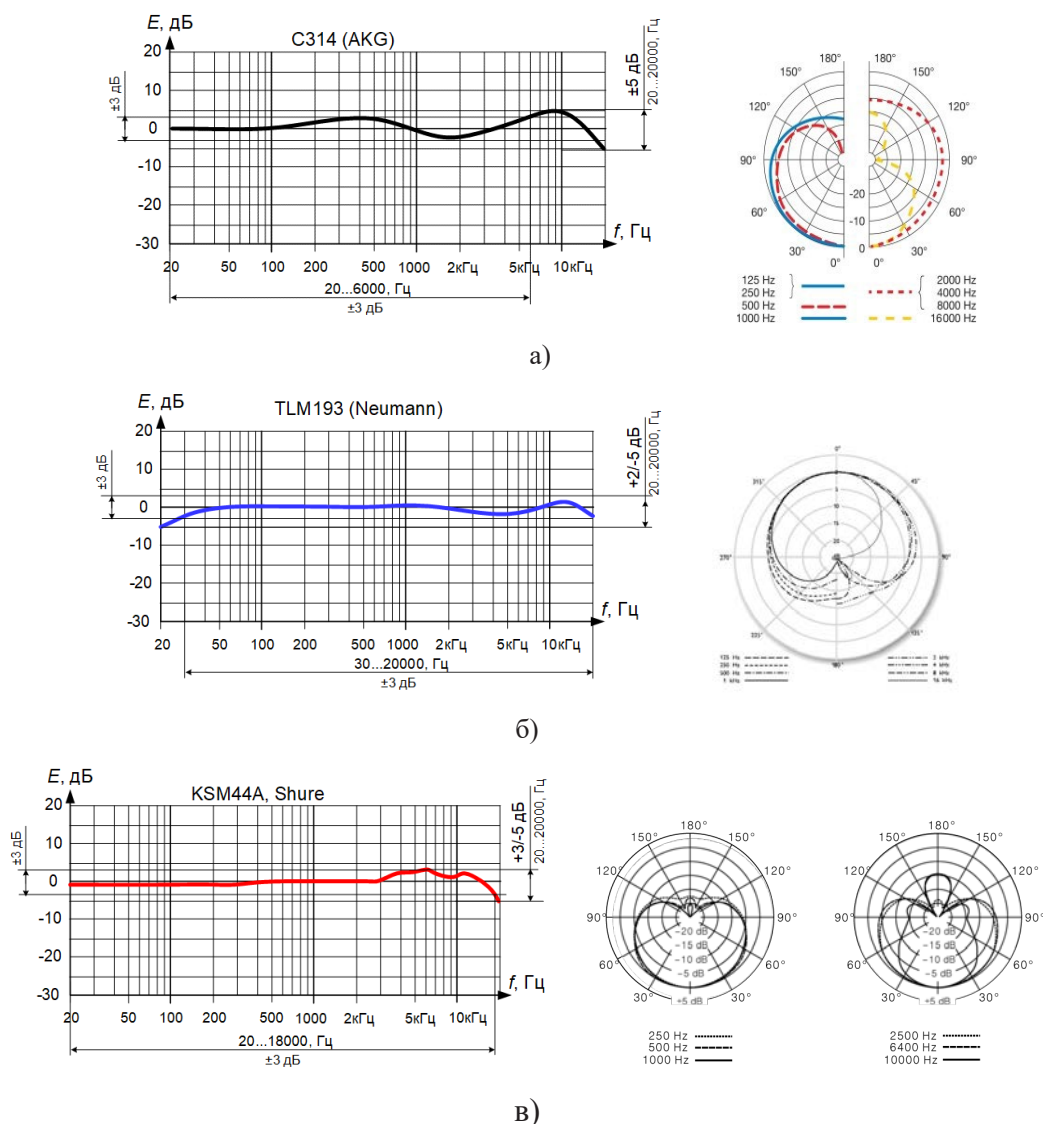


Рис. 3. Частотні характеристики та діаграми спрямованості мікрофонів C314 (AKG) у режимі діаграми спрямованості кардіоїда й без включеного фільтра (а), TLM193 (Neumann) (б) та KSM44A, Shure у режимі діаграми спрямованості кардіоїда (в)

становитиме -7 дБ відносно рівня на осі (рис. 3, б). Під кутом 180°, тобто, з тильної сторони на тій же частоті рівень буде становити приблизно -23 дБ відносно рівня на осі (що не зовсім чітко видно, адже діаграма обмежена рівнем -25 дБ). На частоті 16 кГц рівень сигналу на виході цього мікрофона під кутом 90° становитиме менше -25 дБ (на діаграмі -25 дБ найменше значення), а з тильної сторони на тій же частоті сигнал практично буде відсутній. На нижніх та середніх частотах мікрофон TLM193 (Neumann) має діаграму спрямованості у вигляді типової кардіоїди, а на 16 кГц спостерігається явне спрямування діаграми.

Мікрофон KSM44A (Shure) за отриманою діаграмою спрямованості для кардіоїдної форми створює рівень сигналу на виході мікрофона при розташуванні джерела на відстані 1 м від мікрофона й під кутом 90°, на частоті 1 кГц -7 дБ відносно рівня на осі (рис. 3, в). Під кутом 180°, тобто, з тильної сторони на тій же частоті мікрофон має невеликий «хвіст» і створює рівень приблизно -20 дБ відносно рівня на осі. На частоті 10 кГц рівень сигналу на виході цього мікрофона під кутом 90° становитиме -15 дБ, а з тильної сторони

на тій же частоті додатковий «хвіст» створює сигнал з рівнем -10 дБ. Мікрофон KSM44A (Shure) має діаграму спрямованості не чисто кардіоїдної форми, а більше ця діаграма нагадує суперкардіоїду з різним перепадом чутливості «Фронт-тил».

Висновки. В статті наведено результати розрахунків основних параметрів трьох мікрофонів, і виконано розрахунки додаткових практичних параметрів та проведено порівняльний аналіз за їх окремими параметрами. На основі отриманих результатів, можна дійти висновку, що серед обраних для аналізу мікрофонів за акустичними параметрами кращим вибором є мікрофон KSM44A (Shure). За електричними параметрами кращим мікрофоном можна назвати TLM193 (Neumann). За електроакустичними параметрами встановлено, що мікрофон TLM193 (Neumann) є умовно «золотою» серединою за параметрами. Разом з тим, мікрофон C314 (AKG) буде забезпечувати краще звучання для вокалу, окремих інструментів у запису, а мікрофон KSM44A (Shure) ідеально підійде до загальнопланового, поверхневого запису сигналів, а мікрофон TLM193 (Neumann) для більш чіткого передавання сигналів.

Список літератури:

1. J. Liu, M. Li, N. Wang, "Speech Enhancement with Microphone Array for Active Soundproof Earmuffs," *Circuits Syst Signal Process*, 44, 7966–7988, 2025, doi: 10.1007/s00034-025-03182-x
2. S. John, M. Alberts, J. Karandikar, "Predicting chatter using machine learning and acoustic signals from low-cost microphones," *Int J Adv Manuf Technol*, 125, 5503–5518, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-10918-z
3. R. Wei, Y. Liu, "Experimental study on the mode switching of strong-amplitude tones in slat noise," *Exp Fluids*, 66, 25, 2025, doi: 10.1007/s00348-025-03956-8
4. Гребін О. П., Швайченко В. Б., Левенець Н. Ф. Основи звукотехніки. Політехніка, 2023. 466 с.
5. Інтернет ресурс "Sound system equipment. Part 1: General". URL: <https://standardsclub.com/product/iec-60268-1-amd-1-ed-2-0-b1988/>
6. Інтернет ресурс "Sound system equipment – Part 4: Microphones (IEC 60268-4:2018)". URL: <https://standardsclub.com/product/din-en-iec-60268-4/>
7. Інтернет ресурс "Sound system equipment – Part 22: Electrical and mechanical measurements on transducers. IEC 60268". URL: <https://standardsclub.com/product/din-en-iec-60268-22/>
8. Інтернет ресурс "High fidelity audio equipment and systems: Minimum performance requirements. Part 1: General. IEC 60581". URL: <https://standardsclub.com/product/iec-60581-1-ed-1-0-b1977/>
9. Інтернет ресурс "Measurement microphones – Part 1: Specifications for laboratory standard microphones. IEC 61094". URL: <https://standardsclub.com/product/iec-61094-1-ed-2-0-b2000/>
10. Інтернет ресурс "Measurement microphones – Part 4: Specifications for working standard microphones. IEC 61094". URL: <https://standardsclub.com/product/iec-61094-4-ed-1-0-b1995/>
11. Інтернет ресурс "Measurement microphones – Part 8: Methods for determining the free-field sensitivity of working standard microphones by comparison (IEC 61094-8:2012)". URL: <https://standardsclub.com/product/din-en-61094-8/>
12. Інтернет ресурс "Microphones and earphones for speech communications". URL: <https://standardsclub.com/product/iec-61842-ed-1-0-en2002/>
13. Гребін О. П., Швайченко В. Б., Левенець Н. Ф. Електроакустика. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 145 с.
14. Інтернет ресурс "AKG – C314". URL: <https://www.akg.com/microphones/condenser-microphones/C314.html>
15. Інтернет ресурс "Neumann – TLM193". URL: <https://www.neumann.com/en-us/products/microphones/tlm-193>
16. Інтернет ресурс "Shure – KSM44A". URL: <https://www.shure.com/en-US/docs/guide/KSM44A>

Grebin O.P., Levenets N.F., Trapezon K.O., Tron I.V. COMPARISON OF ELECTROACOUSTIC SIGNAL CONVERTERS IN THE CONTEXT OF SOUND ENGINEERING

The paper analyzes the main parameters of microphones and evaluates their numerical values, in particular with regard to the electrical parameters and electroacoustic characteristics of the latter. These parameters include microphone sensitivity, internal resistance, frequency range, directional pattern, etc. However, as practical experience shows, these parameters do not fully characterize the practical characteristics of the device and do not fully reveal the capabilities of the microphone for professional use. Parameters have been identified that can be calculated as a supplement to the main parameters under various practical conditions of microphone use. Moreover, in the practical application of microphones, there is always a need to compare the acoustic parameters of natural sound signals received by the microphone, both in terms of the direct parameter and the level of this parameter, with the corresponding parameters of the electroacoustic transducers of the microphones.

Mathematical calculations of microphone parameters are considered, the results of which can be used by specialists as a basis for the further selection of microphones for their practical application, for example, in recording studios.

To confirm the practical application of the calculated parameters, the article provides an analysis of the parameters of studio microphones and calculates additional practical parameters for microphone models from AKG, Neumann, and Shure. It was found that among the microphones selected for analysis based on acoustic parameters, the KSM44A (Shure) microphone may be the best choice. In terms of electrical parameters, the TLM193 (Neumann) can be called the best microphone. In terms of electroacoustic parameters, it was established that the TLM193 (Neumann) microphone is conditionally the “golden” middle ground in terms of parameters. At the same time, the C314 (AKG) microphone provides better sound for vocals and individual instruments in recording, while the KSM44A (Shure) microphone is ideal for general, surface recording of signals. The TLM193 (Neumann) microphone is the best among those considered for clearer signal transmission.

Key words: *transducer, sensitivity, microphone, resistance, sound pressure, frequency response, acoustic signal.*

Дата надходження статті: 17.11.2025

Дата прийняття статті: 04.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Обухова Т.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Семененко М.О.

Національна академія наук України

Барбаш В.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мочук П.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕХАНІЗМИ ПЕРЕНОСУ ЗАРЯДУ В СТРУКТУРАХ НАНОЦЕЛЮЛОЗА–МЕЛАНІН

Стаття присвячена дослідженню механізмів діелектричних втрат і природи переносу заряду в багатошарових структурах типу «алюміній – наноцелюлоза – меланін – графіт», виготовлених із використанням водних розчинів меланіну різної концентрації. Актуальність дослідження зумовлена складною структурою меланіну, наявністю суперечливих даних щодо його електронної та іонної провідності, а також перспективністю цього біополімеру для застосувань в органічній електроніці.

В статті за допомогою методу імпедансної спектроскопії в частотному діапазоні 4 Гц – 500 кГц встановлено наявність значних змін діелектричних характеристик при введенні шару меланіну в полімерну структуру. Показано, що за низьких частот домінують втрати, пов'язані з інтерфейсною поляризацією Максвелла–Вагнера, обумовленою рухом іонів води у межових областях меланін–наноцелюлоза. Виявлено зростання тангенса кута діелектричних втрат у діапазоні 100–500 кГц у структурах з меланіном, що свідчить про активацію внутрішніх механізмів релаксації, притаманних полімерній мережі меланіну.

Проведений в статті аналіз АС ВАХ за моделлю Джонхера дозволив визначити показник степеневої залежності $n = 0,38$, що вказує на стрибкоподібний (хопінг) механізм переносу заряду, характерний для аморфних напівпровідників.

Отримані результати демонструють, що провідність меланіну має змішану природу та залежить від ступеня гідратації: за низьких частотах переважає іонна (водна) складова, тоді як за високих – електронно-протонний хопінг у структурі полімеру. Проведений аналіз відкриває можливість цілеспрямованого керування діелектричними властивостями структур з меланіном для застосувань у біоелектроніці, сенсорних структурах та органічних напівпровідникових інтерфейсах.

Ключові слова: меланін, наноцелюлоза, імпедансна спектроскопія, багатошарові органічні структури, органічний гетероперехід.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день обмежене розуміння механізмів провідності меланіну, дослідження якого активно продовжується. Це пояснюється тим, що, на відміну від інших біополімерів, таких як білки та нуклеїнові кислоти, природний біосинтез меланіну не пов'язаний безпосередньо з генетичними або контрольованими послідовністю процесів, а натомість мають місце змінні початкові мономерні одиниці, що

конденсуються, стекуються та полімеризуються в частинки розміром від нанометра до мікрона як композитні матеріали. Вважається, що меланіни утримуються разом завдяки численним взаємодіям, включаючи ковалентний і водневий зв'язки, катіон-π та ароматичні взаємодії [1, с. 2624]. Його висока хімічна складність і погана розчинність у більшості поширених розчинників зробили розуміння зв'язків структура-функція особливо

складним для меланінів. Це ще більше посилюється тим фактом, що матеріали мають високу молекулярну масу та складаються із зшитих олігомерів через механізми π -стекингу під час полімеризації [1, с. 2625].

Відсутність єдиної думки щодо молекулярної електронної структури як природного, так і синтетичного еумеланіну як різновиду меланіну перешкоджає раціональній оптимізації напівпровідникових інтерфейсів на основі цього біопігменту. Більше того, низка суперечностей щодо ключових властивостей еумеланіну все ще залишається остаточно не вирішеною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх двох десятиліть меланін, як природний полімер, активно вивчається у контексті органічної електроніки, біоелектроніки та нанотехнологій. Завдяки своїм унікальним властивостям – змішаній провідності, спектру поглинання в УФ діапазоні, біосумісності та дешевості – меланін вважається перспективною основою для створення широкого спектра пристроїв: від суперконденсаторів до сенсорів та біобатарей [2, с. 14].

Особливу цікавість для науковців представляє можливість створення із застосуванням меланіну пристроїв гнучкої електроніки, зокрема сонячних елементів [2, с. 17] та можливість поєднання шарів меланіну з неорганічними та органічними підкладками [3, с. 4].

Відносна важливість іонних та електронних носіїв заряду, вплив води на провідність та активність радикальних видів все ще є предметом інтенсивних наукових дискусій. Деякі дослідження стверджують, що збільшення провідності еумеланіну залежить від гідратації і, отже, визначають первинними носіями заряду протони [4, с. 130]. Однак інші дослідження вказують на докази як електронного, так і протонного переносу заряду, та високу провідність у вакуумно-відпалених (безводних) плівках еумеланіну [5, с. 3].

Постановка завдання. Метою статті є визначення механізмів діелектричних втрат і природи переносу заряду в структурах наноцелюлоза-меланін.

Виклад основного матеріалу. Отримання зразків. У цьому дослідженні були використані багатошарові сандвіч-структури типу «алюміній–наноцелюлоза–меланін» описані в роботі [6, с. 300].

Як основний діелектричний шар використовувалися плівки наноцелюлози товщиною близько 400 мікрметрів, отримані з волокон очерету, згідно з методикою, описаною в роботі [7, с. 44]. В результаті спеціальної обробки отримані плівки

наноцелюлози, які складалися з однорідних частинок діаметром до 25 нанометрів, утворювали плівки з товщиною до 10 мікрметрів, що забезпечувало рівномірність структури та гладкість поверхні. На зворотній бік плівки наноцелюлози методом магнетронного напилення наносився суцільний шар алюмінію товщиною приблизно 8 мікрметрів, який виконував роль нижнього електрода. На протилежну сторону плівки наноцелюлози за допомогою крапельного методу наносився водний розчин меланіну з розрахунку 0.1 мл/см², концентрацією 0.3–0.5%, отриманий з вихідного 1% розчину меланіну виготовленого відповідно до методики, описаної в патенті [8]. Використання водного розчину дозволило значно спростити процес формування верхнього шару, а також сприяло частковому проникненню меланіну в поверхневі області наноцелюлозної плівки, що забезпечило гарну адгезію між шарами та якісний електричний контакт. Після висушування отримана плівка меланіну мала товщину в межах 1–2 мікрметрів.

Верхній точковий електрод із площею приблизно 1 мм² і товщиною в межах 50–70 мкм формувалася шляхом нанесення на поверхню плівки електропровідної графітової пасті. Площа отриманого конденсатора становила 1 мм².

За такою методикою виготовлено три серії зразків: контрольний зразок без нанесення меланіну на наноцелюлозну плівку та зразки з плівкою меланіну за концентрації вихідного розчину 0,33% та 0,5%.

Методика вимірювання. Для визначення електричних властивостей створеної багатошарової структури застосовувався комплексний аналіз з використанням імпедансної спектроскопії, яка є високочутливим методом дослідження, що дозволяє вивчати процеси поляризації та механізми переносу заряду в широкому частотному діапазоні [9, с. 65]. Зокрема, вона забезпечує доступ до мікро- та макроскопічних аспектів поляризації, виявляючи наявність дипольних моментів, міжфазної поляризації, зарядових пасток, а також характер енергетичних втрат у матеріалі. Метод дозволяє ідентифікувати релаксаційні процеси, визначати тип поляризації (іонну, дипольну, електронну тощо) та їхні частотні діапазони. Цей метод також широко використовується у вивченні фазових переходів, структури доменів, дисперсії діелектричної функції дисперсії та виявлення сегнетоелектричних властивостей. В контексті проведеного дослідження імпедансна спектроскопія

дозволяє встановити не лише якісні зміни в діелектричних властивостях при введенні меланіну, але й зробити висновки про домінуючі механізми провідності та релаксації в отриманих структурах.

В роботі проведено комплексний аналіз частотної залежності ємності досліджуваних структур при впливі змінного електричного сигналу з фіксованою амплітудою 100 мВ. Вимірювання здійснювалися у частотному діапазоні від 4 Гц до 500 кГц, що дозволяє охопити як низькочастотні релаксаційні процеси, так і середньочастотні діелектричні реакції матеріалу. Для реалізації вимірювального процесу використовувався прилад Rohde & Schwarz LCR Meter LCX200 LCR Meter.

У процесі проведення діелектричних вимірювань для інтерпретації отриманих результатів застосовувалася еквівалентна схема з паралельним включенням ємності (C_p) та тангенса кута діелектричних втрат (Dissipation factor), відома як модель паралельного кола C_p -D. У цьому підході ємність (C_p) відповідає здатності структури накопичувати заряд, а параметр D – тангенс кута діелектричних втрат, відображає величину діелектричних втрат, пов'язаних з процесами релаксації, провідністю або поляризаційними механізмами. Використання паралельної моделі дозволило адекватно описати особливості частотної поведінки ємності структури та здійснити розрахунок комплексної діелектричної проникності на основі експериментальних даних.

Для розрахунку складових комплексної діелектричної проникності використано наступні формули:

$$C_p = \epsilon' \epsilon_0 A/d, \quad (1)$$

де C_p – вимірювана ємність, ϵ_0 – діелектрична проникність у вакуумі, ϵ' – дійсна складова комплексної діелектричної проникності, A – площа електрода, d – товщина діелектрика;

$$D = \epsilon''/\epsilon', \quad (2)$$

де D – тангенс кута діелектричних втрат (dissipation factor), ϵ'' – уявна частина комплексної діелектричної проникності.

Аналіз результатів. У контрольному зразку полімерної структури без меланіну за частот нижче 50 Гц уявна частина діелектричної проникності перевищує реальну, що свідчить про домінування втрат енергії над її накопиченням (рис. 1). Це явище, ймовірно, обумовлене наявністю залишкової вологи в структурі наноцелюлози, яка забезпечує іонну провідність та мікроскопічні струми витоку. Дійсна частина діелектричної провідності слабо залежить від частоти, що свідчить про єдиний можливий механізм розсіювання за рахунок провідності. Відсутність ефективних поляризаційних механізмів у наноцелюлозі також знижує значення ϵ' , що підтверджує слабку діелектричну активність матеріалу без додаткових функціональних включень.

Додавання у структуру плівки з вмістом меланіну 0,50% не змінює частотну поведінку діелектричних характеристик, проте вносить суттєві кількісні відмінності (рис. 2). За низьких частот, до приблизно 200 Гц, уявна частина діелектричної проникності ϵ'' , що характеризує втрати електричної енергії, значно перевищує реальну частину ϵ' , яка відповідає здатності структури накопичувати

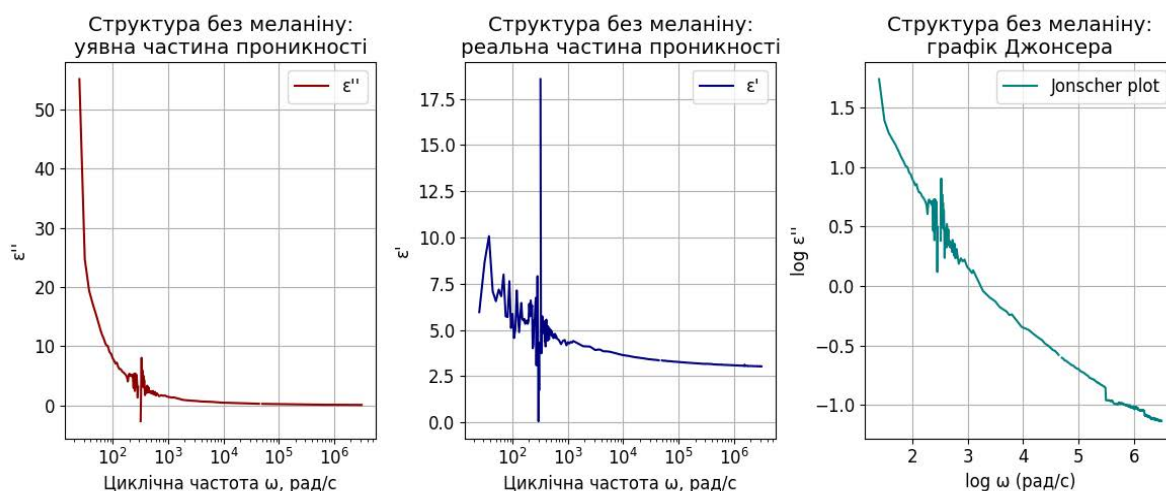


Рис. 1. Дійсна та уявна частини діелектричної проникності та графік частотної залежності уявної частини діелектричної функції (модифікований графік Джонхера) для контрольного зразка без меланіну

заряд. Це вказує на домінування механізмів релаксацийних втрат. При подальшому зростанні частоти співвідношення змінюється: ϵ' перевищує ϵ'' , що свідчить про перехід матеріалу у режим переважного накопичення енергії електричного поля. Кількісно встановлено, що як втрати, так і здатність до поляризації значно зросли у порівнянні з контрольною структурою без меланіну. Значення ϵ'' досягає максимуму близько 500, тоді як ϵ' стабілізується на рівні близько 80, що у 10 разів більше, ніж у контрольній структурі.

У зразка з плівкою меланіну концентрацією 0,33% пікова величина ϵ'' сягає понад 1200, тоді як ϵ' стабілізується на рівні близько 200, тобто значення ϵ майже обернено пропорційними до концентрації меланіну в плівці (рис. 3).

Порівнюючи всі 3 зразки, можна зробити висновок: за низьких частот (до ~ 1 кГц) основний

внесок у діелектричні втрати вносить інтерфейсна поляризація на межі меланін–наноцелюлоза за рахунок залишкових іонів води. Цей ефект відомий як поляризація Максвела–Вагнера, який супроводжується зростанням уявної частини діелектричної проникності ϵ'' . При цьому зразки плівок з вищим вмістом води (тобто меншою концентрацією меланіну) демонструють більші втрати, що підтверджує переважний внесок іонів води в даному діапазоні.

Одним із важливих результатів проведеного дослідження стало виявлення збільшення тангенса діелектричних втрат на межі в інтервалі 100 кГц – 500 кГц для зразків, які містять меланін. Така поведінка може вказувати на активацію додаткових внутрішніх механізмів розсіювання, характерних саме для полімерних структур з меланіном.

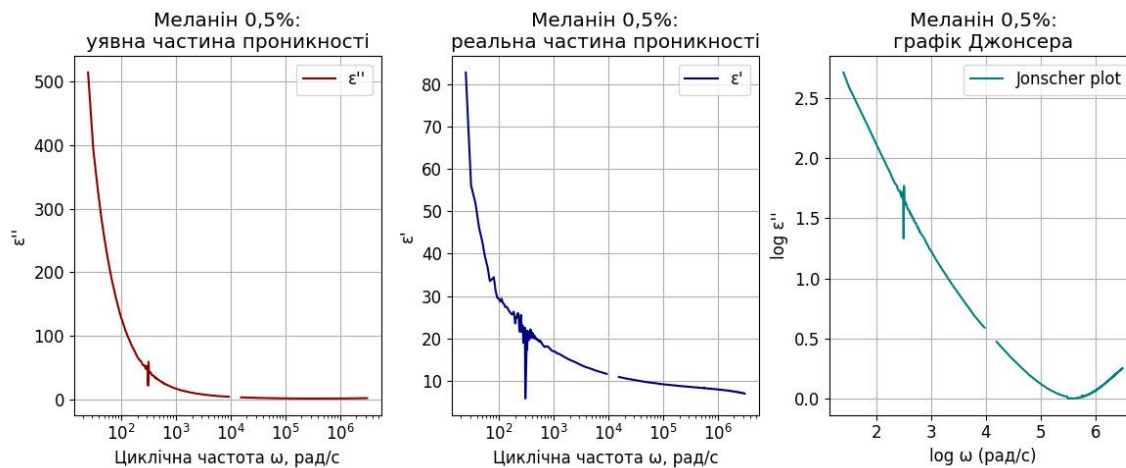


Рис. 2. Дійсна та уявна частини діелектричної проникності та графік частотної залежності уявної частини діелектричної функції (модифікований графік Джонхера) для зразка плівки з 0,50% меланіну

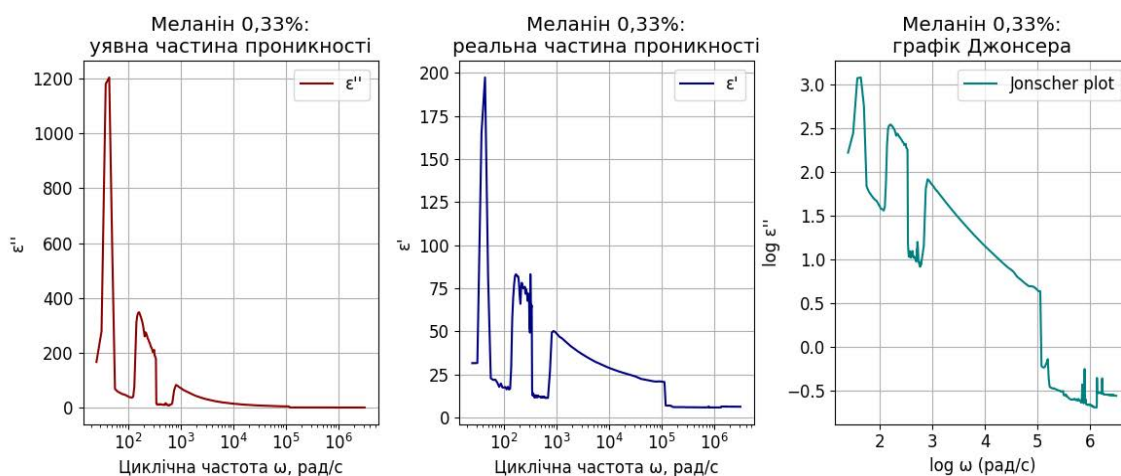


Рис. 3. Дійсна та уявна частини діелектричної проникності та графік частотної залежності уявної частини діелектричної функції (модифікований графік Джонхера) для зразка плівки з 0,33% меланіну

Для вивчення механізмів діелектричних втрат у структурах на основі меланіну застосовано графічний метод Джонхера (Jonscher's Universal Dielectric Response) [10, с. 58]. У класичному формулюванні цей підхід базується на дослідженні частотної залежності змінної провідності матеріалу $\sigma(\omega)$, яка описується виразом:

$$\sigma(\omega) = \sigma_{dc} + A \cdot \omega^n \quad (3)$$

де: σ_{dc} – статична (DC) провідність, ω – циклічна частота, n – показник, що характеризує механізм переносу заряду.

Однак, у випадках, коли пряме вимірювання провідності не проводиться або є складним, допустимим є використання уявної частини діелектричної проникності ϵ'' , яка пов'язана з провідністю через співвідношення:

$$\sigma(\omega) = \epsilon_0 \cdot \omega \cdot \epsilon''(\omega) \quad (4)$$

Таким чином, логарифмічна залежність $\log(\epsilon'')$ від $\log(\omega)$ є лінійно зміщеним аналогом $\log(\sigma(\omega))$ до $\log(\sigma(\omega))$, і може використовуватись для визначення параметра $n = \text{slope} - 1$. Побудовані модифіковані графіки Джонхера зображені на рисунках 1–3.

Найбільш оптимальною для аналізу є залежність для зразка полімерної плівки з 0,50% меланіну. Для даного графіку виконано лінійну апроксимацію, що дозволило визначити коефіцієнт нахилу прямої $n=0,38$. Це значення лежить у межах $0 < n < 1$, що характерно для стрибкоподібного механізму переносу заряду, притаманного аморфним напівпровідникам, до яких належить меланін. Такий підхід широко застосовується в діелектричній імпедансній спектроскопії полімерних, органічних та біологічних матеріалів (зокрема, в дослідженнях поліаніліну, PEDOT:PSS, меланіну тощо).

Щоб з'ясувати природу частинок, які беруть участь у цьому механізмі, слід врахувати структурні особливості меланіну, спосіб його нанесення та ступінь гідратації.

У присутності залишкової вологи, що зберігається після крапельного нанесення водного розчину меланіну, у матеріалі можуть формуватися гідратовані протонні кластери (наприклад, H_3O^+), які переносять заряд за механізмом Гротгуса [11, с. 4195] – тобто стрибками між полярними групами по водневим зв'язкам. Однак, у нашому

випадку діелектричні втрати були вищими для зразків із меншою кількістю залишкової вологи, що зменшує ймовірність того, що протонна провідність є домінуючим механізмом у цьому діапазоні.

Висновки. У роботі досліджено частотні залежності ємності та тангенса кута діелектричних втрат багатошарових сандвіч-структур типу «алюміній – nanoцелюлоза – меланін – графітова паста». Проаналізовано три серії зразків сандвіч-структур, дві з яких містили водний розчин меланіну з концентрацією 0,33% і 0,50% та контрольний зразок без меланіну. Встановлено, що з додаванням шару меланіну в полімерну структуру вводиться додаткова волога, яка суттєво впливає на поведінку системи, зокрема зумовлює підвищення діелектричних втрат. Джерелом втрат виступають рухливі на малих частотах іони води, які підвищують рівень інтерфейсної поляризації на межі меланін–nanoцелюлоза (відповідно до моделі Максвелла–Вагнера).

Ключовим результатом дослідження стало спостереження зростання тангенса кута діелектричних втрат у частотному діапазоні 100–500 кГц, що особливо яскраво видно для зразка з 0,50% вмістом меланіну, має меншу залежність для плівки з 0,33% меланіну і відсутнє для зразка без меланіну. Така поведінка вказує на активацію внутрішніх механізмів втрат, притаманних саме шару меланіну. Для подальшого аналізу було побудовано модифіковану проекцію Джонхера та виконано лінійну апроксимацію у відповідному частотному діапазоні. Отримане значення нахилу прямої $n=0,38$ свідчить про реалізацію стрибкоподібного механізму переносу заряду, характерного для аморфних напівпровідників.

Механізм переносу заряду в меланіні, залежно від умов, може включати електронний хопінг (перехід електронів між локалізованими станами), протонну провідність за механізмом Гротгуса (через водневі зв'язки між молекулами води або функціональними групами) та міграцію гідратованих іонів (зокрема, гідронію H_3O^+) при наявності залишкової вологи. Залежність рівня втрат від вмісту води вказує на те, що за низьких частотах домінують водні іони за механізмом Гротгуса, тоді як за високих – активізується внутрішня структура меланіну, яка забезпечує електронно-протонну хопінг-провідність.

Список літератури:

1. Wei Cao [et al.] Unraveling the structure and function of melanin through synthesis. *Journal of the american chemical society*. 2021. No. 143. P. 2622–2637.
2. Mostert A.B. Melanin, the What, the Why and the How: An Introductory Review for Materials Scientists Interested in Flexible and Versatile Polymers. *Polymers*. 2021. Vol. 13. Article ID: 1670.

3. Benitez-Lara A., Eduardo Coutino-Gonzalez F. Morales-Morales, Mario Alberto Ávila-Gutiérrez, J. Carrillo-Lopez, Ana L. Hernández-Orihuela, and Agustino Martínez Antonio. Vegetal melanin-induced radiative recombination centers in porous silicon. *Optical Materials*. 143. 2023. 114182.
4. Vahidzadeh, Ehsan, Aarat P. Kalra, and Karthik Shankar. Melanin-based electronics: From proton conductors to photovoltaics and beyond. *Biosensors and Bioelectronics*. 122. 2018. 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.09.026>
5. Migliaccio L., et al. Evidence of Unprecedented High Electronic Conductivity in Mammalian Pigment Based Eumelanin Thin Films After Thermal Annealing in Vacuum. *Frontiers in Chemistry*. 2019. Vol. 7. No.162.
6. Обухова Т.Ю., Зінченко А.Ю., Барбаш В.А., Душейко М.Г. Електрофізичні властивості структур меланін-наноцелюлоза. *Вчені Записки Таврійського Національного Університету Імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. Том 35 (74) № 6. 2024. Ч. 2. 299–303.
7. Barbash V.A., Yashchenko O.V., Gondovska A.S., Yakymenko O.S. Nanocellulose from reed stalks to improve the properties of paper for packaging food products. *KPI Science News*. 2021. No. 2. P. 90–96.
8. Davidenko S. Recovering melanin from plant materials, for use e.g. in cancer treatment or as semiconductor, by extracting with sodium hydroxide solution, acidifying extract and purifying precipitate: пат. DE102004003801A1 USA. 2005.
9. Поплавко Ю.М., Молчанов В.І., Казміренко В.А. Мікрохвильова діелектрична спектроскопія. Київ, 2011.
10. Jonscher A. K. Dielectric Relaxation in Solids. London: Chelsea Dielectrics Press. 1983.
11. Pivovarov B. S. An overview of electro-osmosis in fuel cell polymer electrolytes. *Polymer*. 2006. 47(11), 4194–4202.

Obukhova T.Yu., Semenenko M.O., Barbash V.A., Mochuk P.S. MECHANISMS OF CHARGE TRANSPORT IN NANOCELLULOSE–MELANIN STRUCTURES

The article is devoted to the study of dielectric loss mechanisms and the nature of charge transport in multilayer structures of the “aluminum – nanocellulose – melanin – graphite” type, fabricated using aqueous melanin solutions of various concentrations. The relevance of this research stems from the complex structure of melanin, the presence of contradictory data regarding its electronic and ionic conductivity, and the promising potential of this biopolymer for applications in organic electronics.

Using impedance spectroscopy in the frequency range of 4 Hz–500 kHz, the article establishes the presence of significant changes in dielectric characteristics upon the introduction of a melanin layer. It is shown that at low frequencies, losses associated with Maxwell–Wagner interfacial polarization dominate, caused by the movement of water ions in the interfacial regions of melanin–nanocellulose. An increase in the dielectric loss tangent in the 100–500 kHz range is observed in structures containing melanin, indicating the activation of internal relaxation mechanisms inherent to the polymer network of melanin.

The analysis conducted using the Jonscher model made it possible to determine the power-law exponent $n = 0.38$, which indicates a hopping charge-transport mechanism typical of amorphous semiconductors.

The obtained results demonstrate that melanin conductivity has a mixed nature and depends on the degree of hydration: at low frequencies, the ionic (water-related) component prevails, whereas at high frequencies, electron-proton hopping within the polymer structure becomes dominant. The analysis opens the possibility for targeted control of the dielectric properties of melanin-based structures for applications in bioelectronics, sensing devices, and organic semiconductor interfaces.

Key words: melanin, nanocellulose, impedance spectroscopy, multilayer organic structures, organic heterojunction.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 12.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Охрімчук О.Б.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вербицький В.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Прогрес, досягнутий в органічній електроніці, підвищує інтерес до неї в тих областях, де її переваги виявляються найбільшою мірою. Зокрема, це легкі, недорогі, мобільні біоелектронні пристрої, насамперед датчики та фотодетектори. Сфера органічної біоелектроніки та датчиків привертає все більшу увагу розробників сучасних електронних систем. На базі досліджень хімічних, іонних, електронних та оптоелектронних властивостей органічних матеріалів сформовані принципи їх застосування у датчиках, що використовуються в біомедичних, діагностичних і вимірювальних пристроях. Завдяки гнучкості, біосумісності та можливості виготовлення на великих площах органічні матеріали відкривають нові перспективи для створення сенсорів, здатних інтегруватися з біологічними тканинами та поверхнями.

Через різноманітність матеріалів, конструкцій і сфер застосування окремі сегменти органічної електроніки перебувають на різних етапах розвитку. Органічні випромінювачі вже широко використовуються у пристроях відображення інформації, насамперед в екранах телевізорів, мобільних телефонів та інших портативних системах. Водночас сенсори на основі органічних матеріалів лише починають входити у повсякденне життя, демонструючи значний потенціал для медичних діагностичних систем, моніторингу стану довкілля та розумних носимих пристроїв.

У статті зроблено детальний огляд нещодавнього прогресу в органічних оптоелектронних матеріалах і пристроях для біоінтерфейсу. Обговорено стратегії розробки розтяжних біоінтерфейсів із використанням органічних полімерів та напівпровідників, розглянуто переваги їхньої механічної адаптивності та стабільності в біологічних середовищах. Наведено приклади біоінтегрованих органічних оптоелектронних пристроїв для різних застосувань, включно з фотоплівками, гнучкими сенсорними панелями та оптичними детекторами. Отримані результати підкреслюють перспективність органічних матеріалів для створення нового покоління біоелектронних систем із високою ефективністю, екологічною безпечністю та мінімальним енергоспоживанням.

Ключові слова: оптоелектронний сенсор, біоінтерфейс, датчик, органічні матеріали, пристрої.

Постановка проблеми. Органічні сенсори можуть бути побудовані на основі ОПТ, пасивних органічних датчиків або їх комбінації. Найбільші успіхи досягнуті в розробці датчиків чотирьох категорій: біосенсори, датчики тиску, температури та індикатори парової фази. Органічні польові тонкоплівкові транзистори (ОПТ або ОПТТ) були предметом пильної уваги науково-дослідного співтовариства в останні десятиліття. ОПТ – це триполюсник, який, як і звичайні транзистори, забезпечує можливість модуляції електричного потоку, що протікає двома електродами (витоку та стоку) за рахунок модуляції напруги (або струму)

на третьому електроді (затворі). В ОПТ підкладкою є органічний напівпровідник (ОПП). Терміном ОПТ (OFET) позначається велика частина типів органічних транзисторів. Однак залежно від механізму, використовуваного для модуляції потоку, органічних транзисторів, як правило, поділяються на кілька категорій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх десятиліть спостерігається зростаючий науковий інтерес до оптоелектронних сенсорів, створених на основі органічних матеріалів, зокрема органічних тонкоплівкових транзисторів (OTFT). Dimitrakopoulos і Mascaro [1]

здійснили ґрунтовний огляд розвитку органічних тонкоплівкових транзисторів, наголосивши на їхній перспективності у створенні гнучких, легких і дешевих електронних пристроїв, що відкриває нові горизонти для сенсорних технологій. Особливу увагу вчені приділяють електролітично керованим органічним польовим транзисторам, які, як зазначають Wang, Vincent і Piro [2], демонструють високу чутливість та сумісність із біологічними середовищами, що є надзвичайно важливим для біосенсорів. У цьому контексті органічні сенсори проявляють потенціал до інтеграції в портативні аналітичні пристрої. Elkington та співавт. [3] досліджують функціональні характеристики ОТФТ-основних сенсорів, підкреслюючи їхню здатність до селективного виявлення хімічних та біологічних агентів, а також адаптивність до широкого спектра застосувань у медицині, екології та безпеці. Автори вказують на можливість поєднання фоточутливих властивостей органічних матеріалів із транзисторною архітектурою, що забезпечує підвищення ефективності оптоелектронного перетворення сигналів.

Вагомий внесок у розвиток оптоелектроніки здійснили й українські дослідники. Зокрема, Чадюк В. О. [7] у двотомному виданні розкриває фундаментальні засади генерації оптичного випромінювання, особливості взаємодії світла з матеріалами на макро- та нано-рівнях, а також аналізує перспективи використання органічних структур в оптоелектронних приладах нового покоління. Праця вирізняється глибоким аналізом фізичних процесів, що лежать в основі сенсорного функціонування. Також Кожем'яко В. П., Павлов С. В. та Тарновський М. Г. [8] у своїй роботі зосередили увагу на прикладних аспектах оптоелектронної схемотехніки, що має важливе значення для розробки ефективних сенсорних систем на базі органічних матеріалів. Авторами висвітлено питання побудови схем перетворення світлових сигналів в електричні, а також наведено практичні рішення для реалізації сенсорних модулів із заданими характеристиками.

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить про високий рівень зацікавленості світової наукової спільноти до використання органічних матеріалів у конструкції оптоелектронних сенсорів, з акцентом на їх гнучкість, чутливість і потенціал для масштабованого виробництва.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження теоретичних основ та сучасного стану розробки оптоелектронних сенсорів на основі органічних матеріалів, зокрема органічних тонко-

плівкових транзисторів, а також виявлення їхніх функціональних переваг і можливостей застосування у високочутливих сенсорних системах для екологічного моніторингу, біомедицини та аналітичної хімії.

Виклад основного матеріалу. Метою дослідження є вивчення застосування оптоелектронних сенсорів на основі органічних матеріалів.

Оптоелектронні пристрої, такі як сонячні елементи, фотодетектори, лазери та світловипромінювальні діоди (світлодіоди), протягом останніх кількох десятиліть широко використовуються в багатьох аспектах сучасного життя, таких як телекомунікації, енергетика, побутова електроніка та твердотільні освітлювальні прилади. Останнім часом постійно зростає інтерес до розширення застосування оптоелектроніки до біологічних і біомедичних досліджень, щоб запропонувати нові можливості для біосенсору, високоточної терапії, персоналізованої медицини та інтерфейсу «людина-машина» тощо [1–4].

Звичайні високоефективні оптоелектронні пристрої базуються на монокристалічних неорганічних напівпровідниках, таких як кремній або арсенід галію, побудованих на крихких і жорстких підкладках [5–7]. Ці пристрої демонструють значну невідповідність структури та властивостей м'яким і криволінійним біологічним тканинам і органам.

Таким чином, інновації в нових оптоелектронних матеріалах, стратегіях проєктування, виготовленні та техніці інтеграції є критично важливими для створення гнучких і навіть розтяжних оптоелектронних систем для передових застосувань, які можна носити та імплантувати. Органічні напівпровідники мають переконливі альтернативи для біоінтеграції порівняно з неорганічними напівпровідниками. Вони мають широкий спектр надзвичайно привабливих характеристик для застосування, пов'язаного з біотехнологіями, включаючи: механічну гнучкість, адаптованість до оптоелектронних властивостей, низьку температуру обробки розчину, легку вагу та біосумісність [8; 9].

Важливо, що продуктивність органічних електронних пристроїв, таких як органічні тонкоплівкові транзистори (OTFT), органічні світлодіоди (OLED), органічні сонячні батареї (OSC) і органічні фотодетектори (OPD), значно покращилася після піонерської роботи Heeger щодо сполучених полімерів. MacDiarmid і Shirakawa в 1977 році та OLED на основі малих молекул від Tang і Van Slyke в 1987 році [10–12]. Наприклад, ефективність

перетворення електроенергії (PCE) OSC зросла з менш ніж 5% у 2005 році до понад 17% у 2018, тоді як OLED були комерціалізовані Samsung і LG для використання в гнучких дисплеях [3; 4].

Органічні напівпровідникові матеріали загалом можна розділити на два класи: спряжені полімери та малі молекули. Полімери мають високу молекулярну масу, що призводить до повільної швидкості агрегації під час випаровування розчинника, що дозволяє точно налаштовувати морфологію органічних фотоактивних шарів за допомогою різних розчинників і добавок до розчинників.

Полімери вигідні для виготовлення пристроїв великої площі. Малі молекули мають переваги у повторюваності від партії до партії, кристалічності та чудовій рухливості носіїв заряду завдяки сильній міжмолекулярній сполучі π - π . Для створення OSC, OPD і OLED для біоінтеграції використовуються як полімери, так і малі молекули. Незважаючи на свою крихку природу та широкі поточні дослідницькі зусилля з розробки гнучких прозорих електродних матеріалів [5; 6], оксид індію-олова (ITO) все ще залишається основним прозорим електродним матеріалом серед негнучких біоінтегрованих органічних оптоелектронних пристроїв.

Для OSC/OPD на полімерній основі фотоактивний шар зазвичай складається з кон'югованого полімеру р-типу, такого як полі(3-гексилтіофен) (P3HT), і похідного фулерену n-типу, такого як [6,6]-феніл-С61-масляна кислота, метиловий ефір кислоти (PCBM) у структурі об'ємного гетеропереходу (BHJ). Для OSC/OPD на основі невеликих молекул приймається складена двошарова структура з окремим шаром р-типу, таким як пентацен, і шаром n-типу, таким як астріс (8-гідроксихінолін) алюміній. Залежно від завдань, що представляють інтерес, заборонені зони органічних напівпровідників можна регулювати для налаштування спектрів поглинання отриманих пристроїв.

Стратегії проектування органічних оптоелектронних сенсорів. Розтяжні пристрої, які можуть зберігати розроблені оптоелектронні властивості при повторюваних деформаціях розтягування та стиснення, дуже привабливі для біоінтегрованих застосувань, що включають рухи.

Стратегія вигину — це метод, який використовується для створення багатшарових пристроїв, складених у стос, на попередньо розтягнутих еластомерних підкладках із подальшим зняттям напруги після обробки пристрою. Отримані пристрої можуть зберігати початкову продуктивність при розтягуванні до значення попереднього розтягування.

Стратегію поглинання вперше було застосовано для розробки OSC, що розтягуються, у 2011 році шляхом нанесення прозорого анода PEDOT:PSS, активного шару, що складається з P3HT і PCBM, і евтектичного рідкометалевого катода на основі галію та індію безпосередньо на 20% попередньо напруженому полі (диметилсилоксан) [1].

Після звільнення попередньої деформації на отриманій плівці видно пряжки, перпендикулярні до напрямку попередньої деформації. Фотоелектричні характеристики OSC майже не залежать від деформації розтягування до 27%. Перший OLED, що розтягується, був продемонстрований у 2013 році з емісійним шаром на полімерній основі та анодом PEDOT:PSS [2]. Пристрій спочатку виготовляється на ультратонкій поліетилентерефталатній (ПЕТ) фользі на скляній підкладці, а потім переноситься на 100% попередньо напружену еластомерну стрічку. Після розслаблення еластомеру OLED утворює випадкову мережу складок, щоб пристосуватися до деформації стиснення. Отриманий пристрій зберігає електричні характеристики, які можна порівняти з його плоским станом.

Sun та ін. використав лазерно-програмований процес викривлення, щоб реалізувати OLED з високою ефективністю та механічною міцністю, що розтягуються, з OLED на основі малих молекул [23]. Фосфоресцентні зелені OLED спочатку виготовляються за допомогою термічного випаровування на підкладці з полімеру/Si. Потім OLED/полімерна плівка приклеюється до верхньої поверхні попередньо розтягнутої на 120% еластомерної підкладки з одновимірними борозенками з довгим періодом ґратки, підготовленими за допомогою фемтосекундної лазерної абляції. Після звільнення від напруги впорядковані елементи вигину формуються лише для ділянок OLED над канавками. Розтяжність залежить від ширини ліній і канавок. OLED показує світлову ефективність 70 кд/менше 70% деформації, що майже так само, як у ненапруженого пристрою (72,5 кд/А). Спостерігаються невеликі коливання продуктивності при розтягуванні до 100% протягом 15 000 циклів. Пізніше та ж група виготовила двовимірні OLED, що розтягуються, використовуючи подібну стратегію вигину, де OLED переносяться на попередньо розтягнуті за двома осями еластичні підкладки [24].

Отримані пристрої демонструють стабільну ефективність після 100 циклів розтягування-розвільнення від 0 до 25% деформації.

Органічний фотоактивний шар, що розтягується. Ще один простий підхід до розробки

органічних оптоелектронних сенсорів, що розтягуються, полягає в безпосередній розробці еластомерних компонентів для кожного шару пристроїв, включаючи підкладки, провідники, шари транспортування заряду та органічний фотоактивний шар.

Завдяки унікальним характеристикам, доступності, мобільності, одноразовості та простоті конструкції біосенсори перспективні як аналітичні інструменти для охорони здоров'я, моніторингу харчових токсинів та патогенних мікроорганізмів, а також скринінгу навколишнього середовища [3].

Створено велику кількість біосенсорів, переважно для медичних застосувань: аналізу гемоглобіну, глюкози, кальцію, сечовини та багатьох інших критично важливих показників. Біосенсори можуть не тільки визначати такі параметри, як вологість або рН, а й численні типи небіологічних сполук, наприклад важкі метали або невеликі органічні молекули шкідливі речовини, зокрема бісфенол А. Однак досі біодатчики не з'явилися на ринку, можливо, через надто високу вартість виробництва, принаймні, для більшості повсякденних додатків. Але з приходом Інтернету речей, тобто технологій, що пов'язують різноманітні об'єкти в єдину систему, зокрема, інтегруючи датчики медичних застосувань у системи безперервного моніторингу життєвих показників, ринковий потенціал біосенсорів можна реалізувати.

Значні успіхи у розвитку датчиків тиску на основі ОПТ, причому як дискретних, так і об'єднаних у масиви, дозволяють говорити про створення, наприклад, «електронної шкіри» на принципах виявлення тиску та сили (додаються статично або динамічно). Елемент, що сприймає тиск у масиві датчиків для «електронної шкіри», виготовляється з чутливого до тиску каучуку, що містить вуглецеві частинки, і з'єднується з виводом початку транзистора [10].

Електричний опір між верхньою та нижньою поверхнями вуглецевмісного каучукового матеріалу є функцією механічної деформації. Прикладений до нього тиск змінює опір в ланцюзі сток-витік транзистора. Час відгуку датчика тиску становить менше 22 мс. Органічні тонкоплівкові транзистори за своєю природі чутливі до прикладеного тиску [11].

Залежність від тиску транзисторів з органічним напівпровідником на основі пентацену було досліджено із застосуванням одновісного механічного тиску за допомогою голки. Пентацен краще, ніж РЗНТ, підходить для виготовлення датчиків тиску завдяки високому ступеню кристалічності тонкої

плівки, що робить його чутливішим до деформації. Чутливість до тиску в транзисторі, де як підзатворного діелектрика використаний мікроструктурований полідиметилсилоксан (ПДМС), становить 8,4 кПа-1, час відгуку – менше 10 мс, стабільність – висока (понад 15 тис. циклів) при споживаній потужності менше 1 мВт [12].

Датчики тиску на органічних тонкоплівкових транзисторах, які власними силами є підсилювальними елементами, мають підвищену чутливість. При цьому широко представлені простіші за конструкцією датчики тиску, що використовують тензорезистивні та п'єзорезистивні властивості органічних полімерів. Такий датчик є шарувату структуру, в якій полімер розташований між двома електродами [13].

Датчики такого типу досить просто об'єднати в матричні структури з великою кількістю елементів. Оскільки згадані ОПП, як і будь-які напівпровідники, мають температурну чутливість, були зроблені спроби створення на їх основі датчиків температури. Найбільш ефективною виявилася комбінована конструкція, що містить терморезистор із ОПП, з'єднаний з ОПТ (рис. 1).

Нещодавно з'явилася інформація про датчик на гнучкій підкладці [20], який має повноцінну органічну мікросхему, що складається із сенсора та АЦП. Датчик температури – це міст Уїтстона, що складається з полімерних термочутливих плівок, поліетилендіоксітіофена-полістиренсульфонату (PEDOT:PSS) та металевих плівок. Схема зчитування приймає аналоговий сигнал від датчика температури і видає 1 цифровий біт-сигнал, який показує перевищення температурного порога. Продемонстровано також дворозрядний аналого-цифровий перетворювач як схему зчитування. Комбінований датчик температури-тиску (рис. 8) описаний в [21].

Його основою є комбінація термочутливого та п'єзорезистивного матеріалів. Як останні використані PEDOT:PSS та пористий поліуретан (ПУ). Матеріали утворюють шарувату структуру, розташовану між двома електродами. Активний шар отримують шляхом осадження органічного термоелектричного матеріалу на основу, що деформується, що дозволяє одночасно фіксувати зміну температури та тиску. Температурна чутливість датчика 0,1 К та чутливість до тиску – до 28,9 кПа. На основі подібних датчиків, що реагують одночасно на температуру та тиск, можна ближче підійти до створення «електронної шкіри».

Оптогенетика – це початкова технологія, яка дозволяє швидко оптично контролювати цільові

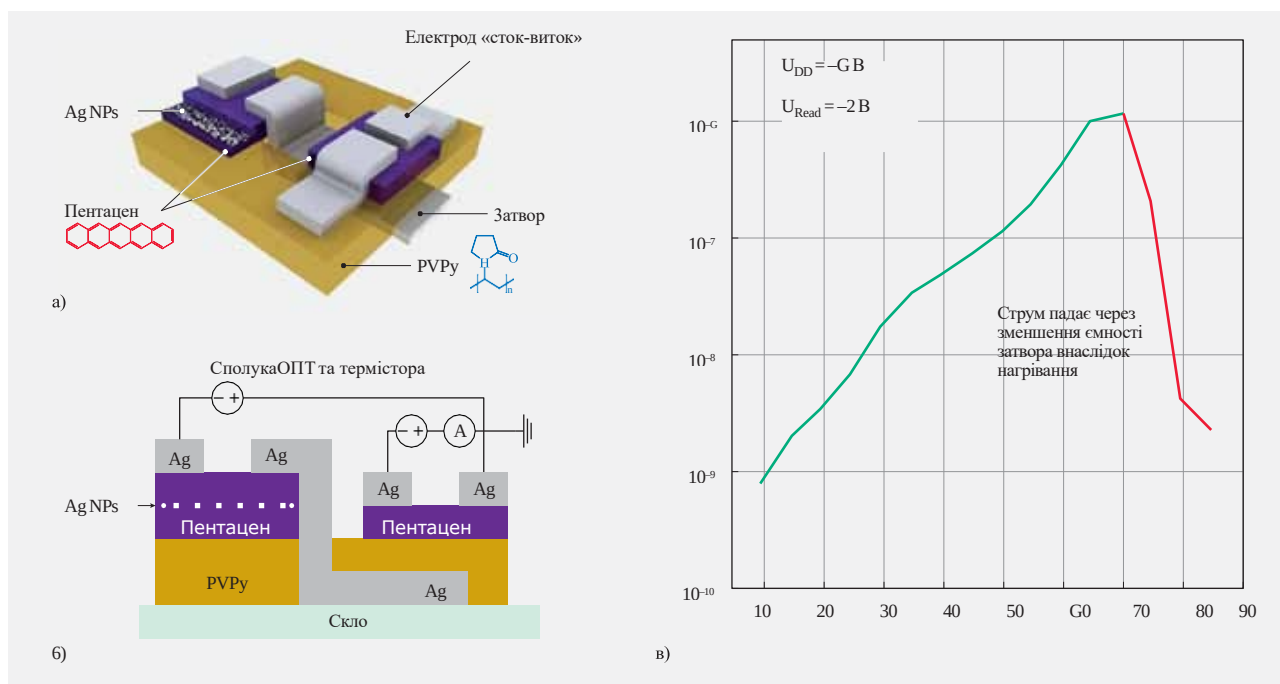


Рис. 1. Температурний датчик: конструкція (а), схема включення та розріз структури (б), температурна залежність струму датчика (в)

конкретні підтипи клітин або нейронів у біологічних системах [47]. Мікромасштабні неорганічні світлодіоди широко використовуються як мінімально інвазивні імплантовані джерела світла для оптогенетичних досліджень [48–51].

Пропозиція OLED кілька основних переваг перед неорганічними світлодіодами для оптогенетики. Наприклад, Young's модуль органічних напівпровідникових матеріалів в OLED зазвичай набагато менший, ніж у неорганічних напівпровідниках в неорганічних світлодіодах, що допомагає мінімізувати реакцію стороннього тіла при хронічних станах. Налаштування емісійних властивостей OLED можна легко здійснити за допомогою хімічного синтезу. Що ще важливіше, OLED можна структурувати в масиви високої щільності субклітинні масштаби довжини (наприклад, 10 мкм) для оптогенетичної модуляції окремих клітин/нейронів за допомогою мікро- та нанофабрики. Група Gather вперше продемонструвала, що мікроматриці OLED запозичені з індустрії мікродисплеїв можна використовувати для безлінзового контролю локального руху живих клітин (рис. 2) [52, 53].

Рисунок 2 описує експериментальну установку. Масив OLED має активну площу близько 20 мм² і 230 000 пікселів, кожен з яких визначається 6 × 9 мкм² розмір алюмінієвого анода. Чергування шарів Al₂O₃ та органічний полімер Varix інкапсулюють пристрої та забезпечують тісний контакт

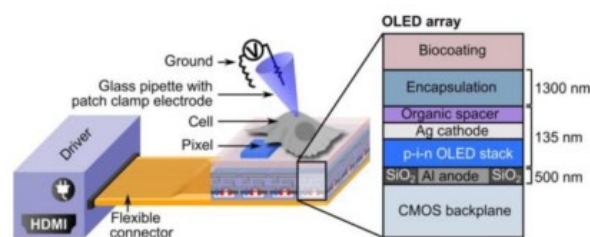


Рис. 2. Схема мікроматриці OLED з клітинами, прикріпленими зверху

із живими клітинами. Нещодавно та ж група повідомила про міліметрові OLED-дисплеї високої яскравості з достатньою інтенсивністю освітлення (0,3 мВт/мм²) для досягнення оптичної активації каналу родопсин-2 (ChR2) in vivo з низькою робочою напругою при 5 В [54].

Виготовляються сині, зелені та оранжеві OLED за допомогою термічного осадження. Рухові нейрони, що експресують ChR2, демонструють найсильнішу поведінкову реакцію до синього підсвічування OLED, тоді як помаранчеве підсвічування OLED не викликає активності клітин до спектральної невідповідності.

Незважаючи на вражаючий прогрес, досягнутий в оптогенетиці, вона вимагає генетичних модифікацій, що ускладнює використання для лікування людей. Негенетичні підходи до оптики стимулюють нейрони або клітини, дуже бажані для застосування in vivo у людей, такі як цен-

тральні або терапевтичні засоби периферичної нервової системи та імплантати для протезів сітківки [55].

Пристрої на основі кремнію були широко вивчені для застосування нейрональної стимуляції [56, 57]. Однак ці прилади є жорсткими та не ідеальними для біоінтерфейсу. Крім того, кремній є напівпровідником із непрямою заборонею зоною, для ефективного збирання фотонів потрібна товщина від десятків до сотень мікрометрів, а також тому обмежує загальну товщину пристрою. Тим часом органічні напівпровідникові матеріали показали здатність фотостимулювати нейрони.

При розробці датчиків на основі органічних напівпровідників було реалізовано два підходи. В ОПТ з багат шаровою структурою органічні матеріали, що використовуються як підкладка або підзатворний діелектрик ОПТ, самі можуть взаємодіяти з аналітом та індукувати зміни у провідності каналу витік-стік. Інший підхід вимагає вбудовування в конструкцію транзистора додаткового матеріалу, який має чутливість і селективністю до аналітів, що розпізнаються. В статті наведено основні конструкції датчиків на ОПТ. Широке розмаїття матеріалів, можливості низькотемпературної технології стимулюють фантазію вчених та інженерів, дозволяють реалізовувати безліч конструкцій. Не всі вони зарекомендують себе надалі. Але експерименти дозволяють відчувати можливості нового нового напрямку мікроелектроніки – полімерної електроніки.

Висновки. Отже, останні досягнення в області органічних напівпровідникових матеріалів і оптоелектронних пристроїв зробили це можливість виготовити гнучкі та розтяжні органічні оптоелек-

тронні біоінтерфейси для багатьох додатків, які можна носити та імплантувати. Нами розглянуто різні типи органічної оптоелектроніки матеріалів, пристроїв, інтегрованих систем і висвітлено поточний стан цього розвитку. Тим часом перед цим необхідно вирішити декілька наукових та інженерних проблем. Вже можна повністю використати переваги органічних оптоелектронних біоінтерфейсів у практичній біологічній галузі. Незадовільна довгострокова екологічна стабільність органічних оптоелектронних сенсорів повинна бути вдосконалена. Це вимагає розробки інноваційних органічних оптоелектронних матеріалів, які є стабільними під час дії повітря і біологічні рідини для зондування/стимуляції та стратегії інкапсуляції для захисту інших частини приладів.

У результаті потрібне вивчення молекулярного дизайну та правила розробки нових органічних напівпровідникових матеріалів, які демонструють чудові оптоелектронні та механічні властивості та біосумісність. Наразі не вистачає механістичних моделей щоб повністю зрозуміти інтерфейс органічного пристрою. Інші важливі майбутні дослідження у цьому напрямку включають інтеграцію з передовими електронними модулями для бездротового зв'язку або функціональні компоненти, такі як мікроелектромеханічні підсистеми та мікрофлюїдні канали для багатофункціонального зондування/стимуляції.

Синергічні зусилля хіміків, інженерів, фізиків та біологів мають вирішальне значення для подальшого прогресу в цій сфері. Таким чином, застосування оптоелектронних сенсорів на основі органічних матеріалів пропонують сприятливий майданчик для подальших фундаментальних наукових відкриттів та клінічного застосування.

Список літератури:

1. Dimitrakopoulos C.D., Mascaro D.J. Organic thin-film transistors: A review of recent advances. *IBM J.Res. Dev.* 2021. Vol. 45. P. 11–27.
2. Wang D.N.Vincent, Piro B. Electrolytic Gated Organic Field-Effect Transistors for Application in Biosensors. *A Review Electronics*. 2016. Vol. 5. № 9. <https://doi.org/10.3390/electronics5010009>.
3. Elkington D., Cooling N., Belcher W., Dastoor P.C., Zhou X. Organic Thin-Film Transistor (OTFT) – Based Sensors. *Electronics*. 2019. № 3. P. 234–254
4. Xiaohui Ren, Gengcheng Liao, Zhongjun Li. et al. Two-dimensional MOF and COF nanosheets for next-generation optoelectronic applications. *Coordination Chemistry Reviews*. 2021. V. 435. ID 213781.
5. Fakun K. Wang, Sijie J. Yang, Tianyou Y. Zhai Wang. 2D Bi₂Se₃ materials for optoelectronics. *iScience*. 2021. V. 24. ID 103291
6. Xia Y., Cho J.H., Lee J., Ruden P.P., Frisbie C.D. Comparison of the mobility-carrier density relation in polymer and single-crystal organic transistors employing vacuum and liquid gate dielectrics. *Adv. Mater.* 2009. Vol. 21. P. 2174–2179
7. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання. У 2 кн. / В. О. Чадюк. Київ : НТУУ «КПІ», 2019. Кн. 1. 380 с. Кн 2. 436 с.

8. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. УНІВЕРСУМ, Вінниця, 2018. 189 с.
9. Cho J.H., Lee J., He Y., Kim B., Lodge T.P., Frisbie C.D. High-capacitance ion gel gate dielectrics with faster polarization response times for organic thin film transistors. *Adv. Mater.* 2018. Vol. 20. P. 686–690.
10. Cotrone S., Ambrico M., Toss H., Angione M.D., Magliulo M., Mallardi A., Berggren M., Palazzo G., Horowitz G., Ligonzo T. Phospholipid film in electrolyte-gated organic field-effect transistors. *Org. Electron.* 2022. Vol. 13. P. 638–644
11. Manoli K., Dumitru L.M., Mulla M.Y., Magliulo M., Franco C.D., Santacroce M.V., Scamarcio G., Torsi L. A comparative study of the gas sensing behavior in p3htand pbttt-based offts: The influence of film morphology and contact electrode position. *Sensors.* 2024. Vol. 14. P. 16869–16880.
12. Schwartz G., Tee B.C.-K., Mei J., Appleton A.L., Wang H., Bao Z. Flexible polymer transistors with high pressure sensitivity for application in electronic skin and health monitoring. *Nat. Commun.* 2023. Vol. 4. P. 1859.

Okhrimchuk O.B., Verbytskyi V.H. APPLICATION OF OPTOELECTRONIC SENSORS BASED ON ORGANIC MATERIALS

The progress achieved in organic electronics has significantly increased interest in its use in areas where its advantages are most evident. In particular, lightweight, low-cost, and flexible bioelectronic devices such as sensors and photodetectors are among the most promising applications. The field of organic bioelectronics and sensors is attracting growing attention from researchers and developers of modern electronic systems. Based on studies of the chemical, ionic, electronic, and optoelectronic properties of organic materials, fundamental principles have been established for their application in sensors used in biomedical, diagnostic, and measurement devices. Due to their flexibility, biocompatibility, and capability for large-area fabrication, organic materials offer new opportunities for creating sensors that can integrate seamlessly with biological tissues and surfaces.

Because of the diversity of materials, designs, and applications, various segments of organic electronics are currently at different stages of development. Organic light-emitting devices are already widely used in information display systems such as television screens, mobile phones, and other portable devices. Meanwhile, organic-material-based sensors are only beginning to enter everyday life, showing great potential for medical diagnostics, environmental monitoring, and wearable smart technologies.

This article provides a detailed overview of recent progress in organic optoelectronic materials and devices for biointerfaces. It discusses strategies for developing stretchable biointerfaces using organic polymers and semiconductors, emphasizing their mechanical adaptability and stability in biological environments. Examples of biointegrated organic optoelectronic devices for various applications – including photofilms, flexible sensing panels, and optical detectors – are presented. The findings highlight the promise of organic materials for creating a new generation of bioelectronic systems with high efficiency, environmental safety, and low energy consumption.

Key words: optoelectronic sensor; biointerface, sensor; organic materials, devices.

Дата надходження статті: 10.11.2025

Дата прийняття статті: 27.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Semenenko M.O.

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine
Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Obukhova T.Yu.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Koval V.M.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Kravchenko S.O.

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine
Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Chopyk V.V.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Sarikov A.V.

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine
Taras Shevchenko National University of Kyiv
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES WITH PHTHALOCYANINE LAYERS FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

The article investigates the electrophysical properties of heterostructures based on porous silicon with deposited layers of copper and lead phthalocyanines, which are promising organic materials for next-generation photovoltaics. The relevance of the study is driven by the search for inexpensive, flexible, and stable organic photoconverters capable of complementing or replacing traditional silicon solar cells. The porous layer was obtained using metal-assisted chemical etching, after which solutions of CuPc and PbPc in DMSO were applied to the prepared surface. The electrophysical characteristics were examined by impedance spectroscopy and DC I–V measurements.

It is shown that the heterostructures exhibit rectifying behavior; however, the conduction mechanisms strongly depend on the type of central metal in the macrocycle. For the por-Si/CuPc structure, three characteristic conduction regions were identified, corresponding to thermo-field emission, recombination processes in the space-charge region, and current limitation by the series resistance. In the case of por-Si/PbPc, the dominance of series resistance is observed already at ultralow voltages (above 0.006 V), indicating the formation of a high-resistance interface and poorer transport properties compared to CuPc.

Molecular modeling of CuPc and PbPc presented in the article showed that the lead complex is significantly non-planar due to the much larger ionic radius of Pb^{2+} , whereas CuPc retains a planar conformation. The non-planarity of PbPc leads to an increase in internal strain within the molecule and worsens energy alignment at the heterojunction, which correlates with the observed high value of series resistance. Analysis of the frequency dependence of conductivity confirmed the dominance of the drift mechanism of charge transport up to frequencies of 10^6 rad/s for both structures.

The obtained results demonstrate the critical role of the central metal in forming energy barriers and transport properties of por-Si/McPc heterostructures and identify CuPc as a more suitable material for developing efficient organic–inorganic photoconverters.

Key words: metal–phthalocyanine films, macrocycle, organic heterojunction, porous silicon, I–V characteristics.

Formulation of the problem. Photovoltaics is one of the most promising areas of modern energy production, as it enables the generation of electricity from a constant and free energy source—the Sun. The use of solar panels makes it possible to increase the energy independence of portable devices, individual buildings, and even entire countries, while not polluting the environment. The main challenges of modern silicon photovoltaics, which dominates terrestrial applications, are related to the need to increase efficiency and reduce the production cost of solar cells in order to ultimately decrease the cost of 1 kWh of energy [1, p. 2].

In addition, a current societal demand is the development of lightweight and flexible photoconverters capable of powering wearable electronic devices [2]. Therefore, a clear shift has emerged in the field of photovoltaics—from monocrystalline silicon solar cells toward devices based on organic analogues. The use of organic materials in photovoltaic device fabrication makes it possible to significantly reduce the temperature of standard technological processes (vacuum technologies [3, p. 1735; 4, p. 2]), employ inexpensive synthesis methods (roll-to-roll printing, solution processing [5, p. 17]), broaden the absorption spectrum of solar radiation (due to the ability to modify chemical composition [6, p. 379]), enable the fabrication of flexible panel designs [5, p. 10], and even achieve integration with textiles [7, p. 3872].

Thus, organic photovoltaic devices open up promising opportunities for the development of low-cost, lightweight, flexible, and spectrally adaptable solar energy systems.

Analysis of recent research and publications. Modern literature presents studies on various types of organic materials (electron donors and acceptors) for use in the active layer of organic solar cells, where light absorption, exciton generation, and their separation into free charge carriers occur, determining the energy conversion efficiency [5, p. 3]. In particular, the active layer of such a solar cell may include donor materials such as conjugated polymers [5, p. 7], merocyanines [8, p. 320], porphyrins [9, p. 20172], phthalocyanines [10, p. 2], or small donor–acceptor molecules [11, p. 4].

Among these, phthalocyanines represent one of the most promising classes of organic semiconductors for use in organic photovoltaic devices due to their relatively high thermal stability (they do not decompose at 300–400 °C), chemical stability (resistant to oxygen, moisture, etc.), and photostability (resistant to UV radiation) [12, p. 16; 13, p. 803]. In other words, unlike polymers, this material can sig-

nificantly improve the stability of organic solar cells and, consequently, their service life, which is one of the main limitations of such devices.

Phthalocyanines are among the few organic materials well-suited for vacuum deposition, which ensures high-purity films, precise thickness control at the nanometer level, and the possibility of obtaining a crystalline structure [10, p. 5]. Polymeric materials, which are mostly processed using solution-based technologies, do not always provide such reproducibility in chemical composition and structure.

Moreover, phthalocyanines allow flexible modification of their energy levels by incorporating different central metals (Cu, Zn, Co, Fe, Pb) [14, p. 3], which determines their electrical and optical properties. Specifically, Cu-doped phthalocyanines have absorption maxima in the visible range, whereas Pb-doped phthalocyanines absorb in the infrared (IR) range, where most polymers do not [15, p. 6]. Clearly, combining both types of phthalocyanines can significantly broaden the spectral efficiency of such solar cells (from UV to IR). Additionally, different central atoms and synthesis conditions will provide varied electron transport characteristics [10, p. 4]. Therefore, establishing the influence of synthesis conditions and substrate type on the electrophysical properties of metal–phthalocyanine films requires more detailed investigation.

Task statement. The aim of the article is to investigate the electrophysical properties of metal phthalocyanine layers on porous silicon and to model the molecular structure of phthalocyanines in order to determine the charge transport mechanisms in organic–inorganic heterojunctions.

Outline of the main material of the study.

Sample preparation. The porous layer was formed using a two-step metal-assisted chemical etching method with the following solutions:

1. Silver deposition solution: 68 mg of silver nitrate (AgNO_3) was dissolved in 10 ml of distilled water, then 4.42 ml of 40% hydrofluoric acid (HF) was added, and the total volume was brought to 20 ml with distilled water.

2. Etching solution: 11 ml of 40% HF was added to 30 ml of distilled water, followed by the addition of hydrogen peroxide (H_2O_2), and the total volume was adjusted to 50 ml with distilled water.

The samples were immersed in the first solution for 20 or 40 seconds to deposit silver particles. Afterward, all wafers were rinsed with distilled water. Both groups of samples were then transferred to the second solution for etching for 45 minutes. After etching, the wafers were immediately rinsed with distilled water

and dried in a centrifuge. The formation of porous silicon was visually confirmed by the characteristic red photoluminescence under UV light. Finally, residual silver catalyst was removed from the surface by prolonged treatment (8 hours) in nitric acid.

Next, solutions of copper and lead phthalocyanines were applied to the surface of the porous silicon. $5 \cdot 10^{-4}$ M solutions of phthalocyanines in dimethyl sulfoxide (DMSO) were prepared and applied dropwise to the porous silicon surface (0.1 ml/cm^2). DMSO was chosen because it is one of the few highly polar aprotic solvents capable of overcoming strong intermolecular interactions (aggregation) between phthalocyanine macrocycles and maintaining them on the surface, followed by vacuum drying at room temperature under 10^{-5} mmHg for 24 hours.

Impedance and I–V measurements. The electro-physical characteristics of the samples were measured using a modern LCR meter (ROHDE & SCHWARZ LCX 200) and the Keithley 2450 SMU system, following the methodology described in [16]. For DC I–V and impedance measurements, the contact area was formed using a thick rectangular indium (In) bar ($2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$). The overall measurement scheme for the equivalent circuit was as follows: Bottom – Ag/In/Al/por-Si/McPc/In/Au – Top.

Processing and visualization of experimental data were performed using the OriginLab software environment. The frequency dependence of AC conductivity was studied in the $|Z|$ -phase mode with automatic determination of all components of the complex impedance in a parallel equivalent circuit configuration.

The total conductivity (σ_{total}) consists of DC and AC components and was calculated using the formula [17]:

$$\sigma_{\text{total}}(\omega) = \sigma_{\text{dc}} + \sigma_{\text{ac}}(\omega) \quad (1)$$

For many disordered materials, including organic semiconductors, the frequency dependence of AC conductivity, $\sigma_{\text{ac}}(\omega)$, follows Jonscher's universal power law:

$$\sigma_{\text{ac}}(\omega) = A\omega^s \quad (2)$$

where A is a temperature-dependent pre-exponential factor, and s is a dimensionless exponent, usually in the range $0 < s < 1$.

Figure 1 shows the I–V characteristics of the investigated por-Si heterostructures in the geometry Bottom – Ag/In/Al/por-Si/McPc/In/Au – Top with copper and lead phthalocyanines, presented in linear (a) and semi-logarithmic (b) scales. From Fig. 1a, it is evident that the I–V curves are typical for a barrier structure, and the por-Si/McPc heterojunction exhibits its rectifying behavior.

For the por-Si/CuPc structure, the forward-bias I–V curve on the semi-logarithmic plot (Fig. 1b) shows three distinct linear regions, indicating a sequential change of conduction mechanisms. The low-voltage region (I) corresponds to conduction via the thermally assisted field emission mechanism (the rectifying region). The transition to region (II) is characterized by a decrease in slope, indicating the dominance of charge carrier recombination in the space-charge region of the heterojunction. At voltages above 0.29 V, a significant downward bending of the curve occurs (region III), resulting from current limitation by the series resistance of the material.

For the por-Si/PbPc structure, the device exhibits exponential conduction only within a narrow range up to 0.006 V (linear portion of the I–V curve). At higher voltages, the curve rapidly deviates from ideal diode behavior, bending downward. This behavior indicates a much higher series resistance in the por-Si/PbPc structure, which becomes dominant even at very low currents and voltages. This may be related to the poorer intrinsic conductivity of lead phthalocyanine or to the formation of a high-resistance layer at the interface.

Fig. 2 shows the AC I–V characteristics of the investigated por-Si heterostructures in the geometry Bottom – Ag/In/Al/por-Si/McPc/In/Au – Top, presented in the Jonscher projection. For the por-Si/CuPc structure (Fig. 2a) and the por-Si/PbPc structure (Fig. 2b), the DC component in Jonscher's power law is observed up to frequencies of 10^6 rad/s, indicating the dominance of charge carrier drift over accumulation processes at interfaces or traps.

Structural modeling. The molecular structures of Cu and Pb phthalocyanines were built using Chem3D through structure optimization by minimizing the total potential energy of the molecule (MM2 minimization). The HOMO and LUMO energy levels were obtained using Chem3D's built-in Extended Hückel computational algorithm. For CuPc, the values were: LUMO = -4.02 eV ; HOMO = -4.452 eV . For PbPc, the values were: LUMO = -4.526 eV ; HOMO = -4.58 eV . The electronic structures of the HOMO and LUMO of CuPc, ZnPc, FePc, TiOPc, and PbPc are presented in [19], and CuPc alone was calculated using the DFT method in Gaussian09 [18].

Figure 3 shows the three-dimensional models of the copper and lead phthalocyanine macrocycles. For PbPc, before energy minimization, the Pb atom was manually placed at the center of the macrocycle to preserve planarity during the initial structural setup. However, after geometry optimization and energy minimization, the calculation algorithm displaced the Pb atom relative to the plane of the molecule.

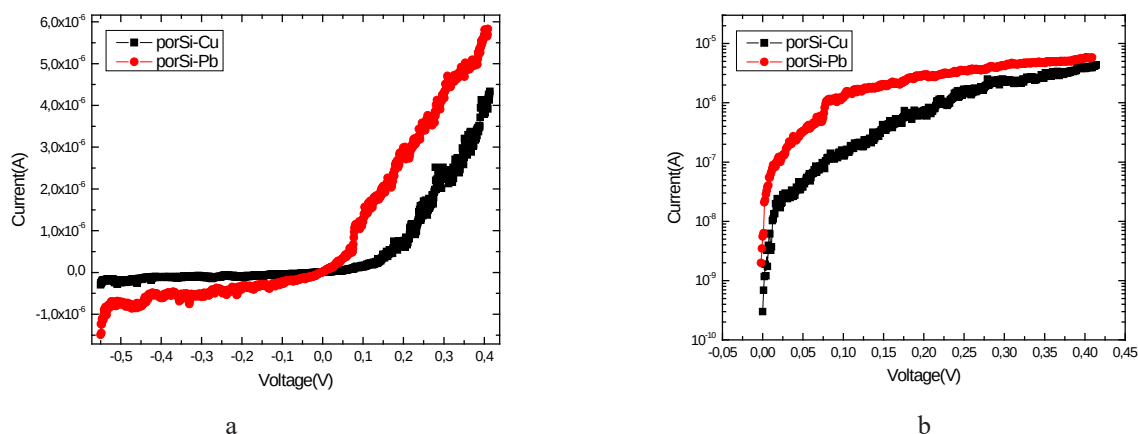


Fig. 1. Current–voltage characteristics of the investigated por-Si heterostructures with copper and lead phthalocyanines in linear (a) and semi-logarithmic (b) representation

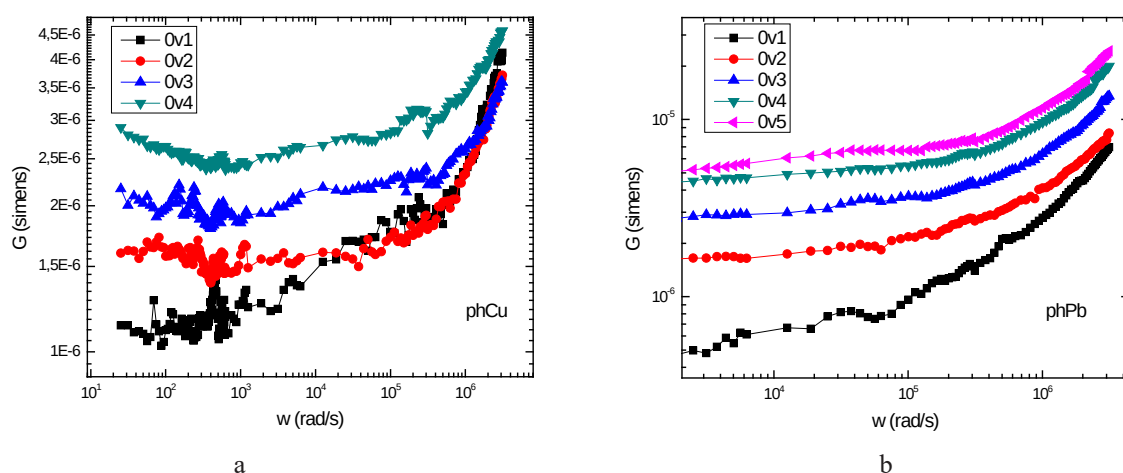


Fig. 2. AC current–voltage characteristics of the investigated por-Si heterostructures with copper (a) and lead (b) phthalocyanines, presented in the Jonscher projection

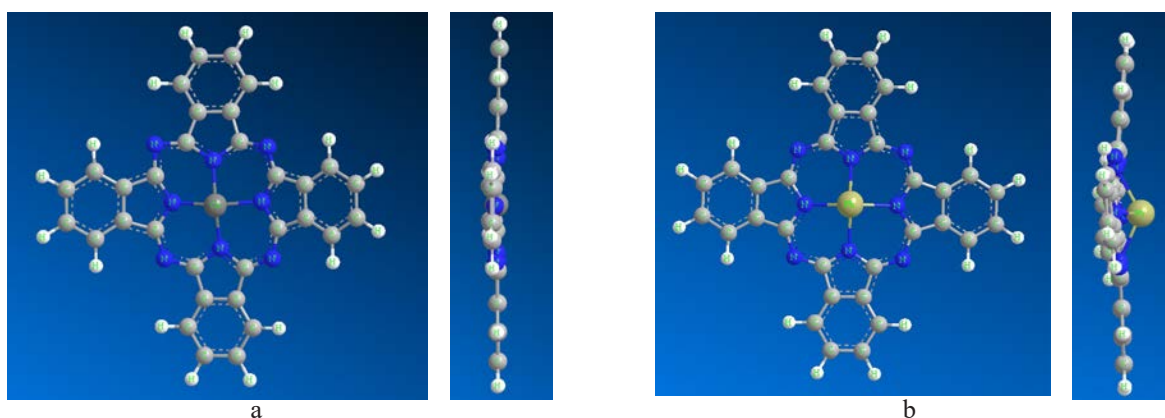


Fig. 3. Three-dimensional models of the copper (CuPc) and lead (PbPc) phthalocyanine macrocycles in different projections

The figure shows the resulting structures of CuPc and PbPc obtained after minimizing the total energy of each individual molecule. It is evident that the Pb atom is positioned above the plane of the macrocycle. This is due to the ionic radius of Pb^{2+} (≈ 119 pm) being significantly larger than that of Cu^{2+} (≈ 73 pm), so the lead atom cannot geometrically fit into the internal cavity of the phthalocyanine macrocycle, which con-

sists of four indole fragments condensed into a flat aromatic heterostructure. Due to the oversized Pb^{2+} ion, the macrocycle cannot maintain planar coordination with the nitrogen atoms, resulting in pronounced non-planarity (out-of-plane displacement) for the PbPc complex.

Thus, the significantly larger size of the lead ion induces considerable strain in the molecule, increas-

ing the total energy of the complex and making the planar conformation energetically unstable. In contrast, the smaller copper ion fits perfectly into the central cavity, minimizing strain and stabilizing a planar geometry. For PbPc, displacement out of the plane and adoption of a non-planar conformation is energetically favorable. This deformation relieves internal strain and achieves a more stable configuration, despite weakening and elongating the Pb–N bonds compared to the in-plane Cu–N bonds.

The planarity of the macrocycle determines the degree of ideality of the Ag/In/Al/por-Si/McPc/In/Au heterojunction, which directly affects charge transport across the interface. A schematic representation of charge transport in a p-type organic semiconductor, based on the percolation model with variable-range hopping and multiple trapping–release mechanisms, is described in [18]. It is based on the relative positions of the LUMO and HOMO levels of the organic semiconductor with respect to the conduction and valence bands of porous silicon.

Considering that the structure uses porous silicon with crystallite sizes not exceeding 2.8 nm (to observe photoluminescence and ensure sufficient electron transport through the porous layer), the quantum confinement effect becomes dominant [20]. This significantly increases the bandgap and reduces the electron affinity to values in the range of 3.0–3.5 eV (compared to 4.05 eV for bulk Si according to tabulated data).

This critical factor alters the injection picture: the LUMO levels of both CuPc (–4.02 eV) and PbPc (–4.526 eV) are lower in energy than the reduced electron affinity of PS (3.0–3.5 eV), creating favorable conditions for electron injection from PS into the LUMO of the organic layer. Meanwhile, the HOMO levels of both macrocycles lie above the valence band of porous silicon, forming a potential barrier for hole injection.

This explains the observed non-ideal diode behavior and the early dominance of series resistance (particularly for PS/PbPc), since charge transport in for-

ward bias is limited not by ideal Shockley diffusion but by thermal activation over these injection barriers and trap-controlled mechanisms.

Conclusions. A critical influence of the central metal on the morphology and energy alignment of the heterojunctions has been established. Modeling showed that due to the large ionic radius of Pb^{2+} , unlike Cu^{2+} , the lead phthalocyanine complex (PbPc) adopts a pronounced non-planar conformation. Analysis of the DC I–V characteristics revealed that this structural mismatch correlates with a significantly higher series resistance in the por-Si/PbPc structure, which dominates at voltages above 0.006 V, indicating the formation of a high-resistance interfacial layer and/or poorer intrinsic conductivity of the organic film compared to por-Si/CuPc.

The DC I–V analysis identified a sequential change in conduction mechanisms for CuPc and a limited diode behavior for PbPc. For the por-Si/CuPc structure, the I–V curve shows three distinct linear regions: (I) thermally assisted field emission (rectification), (II) recombination in the space-charge region (decrease in slope), and (III) current limitation by series resistance. In contrast, the rapid deviation from ideal diode behavior in por-Si/PbPc indicates early dominance of series resistance, which, combined with injection energy barriers (due to the reduced electron affinity of PS, 3.0–3.5 eV), suggests that charge transport is limited by thermal activation over barriers and/or trap-controlled mechanisms, consistent with the percolation model.

This work has been supported by the Project «Development of photovoltaic cells and thin-film photoconverters based on organic solar light absorbers» is financially supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine, state registration number 0125U001660 and Project No. 5.8/25-II “Energy-saving and environmentally friendly nanoscale ferroics for the development of sensorics, nanoelectronics and spintronics” of the Target Program of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Bibliography:

1. Di Sabatino M., Hendawi R., Garcia A. S. Silicon Solar Cells: Trends, Manufacturing Challenges, and AI Perspectives. *Crystals*. 2024. Vol. 14, № 2. P. 167. <https://doi.org/10.3390/cryst14020167>
2. Aftab S., Koyyada G., Ali Z., Assiri M. A., Kim J. H., Rubab N., Akman E. Flexible perovskite solar cells: A revolutionary approach for wearable electronics and sensors. *Materials Today Energy*. 2025. Vol. 51. P. 101872. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2025.101872>
3. Chiu K.-C., Juey L.-T., Su C.-F., Tang S.-J., Jong M.-N., Wang S.-S., Wang J.-S., Yang C.-S., Chou W.-C. Effects of source and substrate temperatures on the properties of ITO/CuPc/C60 heterostructure prepared by physical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*. 2008. Vol. 310. P. 1734–1738.
4. Guruswathi S., Ramesh S., Ashok Kumar A., Rajagopal Reddy V. Optical, morphological, structural and photo-electrical properties of Ni-phthalocyanine/n-Ge heterojunction for optoelectronic applications. *Thin Solid Films*. 2024. Vol. 803. P. 140460. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140460>

5. Majhi J., Ghosh S., Priya K., Sharma S., Bandyopadhyay A. A critical review on the progress of emerging active and substrate materials for organic solar cells and device level fabrication techniques by solution process method. *Next Materials*. 2025. Vol. 8. P. 100595. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100595>
6. Bruder I., Schöneboom J., Dinnebier R., Ojala A., Schäfer S., Sens R., Erk P., Weis J. What determines the performance of metal phthalocyanines (MPc, M=Zn, Cu, Ni, Fe) in organic heterojunction solar cells? A combined experimental and theoretical investigation. *Organic Electronics*. 2010. Vol. 11, № 3. P. 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2009.11.016>
7. Ali I., Islam M. R., Yin J., Eichhorn S. J., Chen J., Karim N., Afroj S. Advances in Smart Photovoltaic Textiles. *ACS Nano*. 2024. Vol. 18, № 5. P. 3871–3915. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c10033>
8. Chen K.-W., Huang C.-W., Lin S.-Y., Liu Y.-H., Chatterjee T., Hung W.-Y., Liu S.-W., Wong K.-T. Merocyanines for vacuum-deposited small-molecule organic solar cells. *Organic Electronics*. 2015. Vol. 26. P. 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2015.07.050>
9. Han L.-H., Zhang C.-R., Zhe J.-W., Jin N.-Z., Shen Y.-L., Wang W., Gong J.-J., Chen Y.-H., Liu Z.-J. Understanding the Electronic Structures and Absorption Properties of Porphyrin Sensitizers YD2 and YD2-o-C8 for Dye-Sensitized Solar Cells. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013. Vol. 14, № 10. P. 20171–20188. <https://doi.org/10.3390/ijms141020171>
10. Pavani M., Ashok Kumar A., Rajagopal Reddy V., Kaleemulla S., Jyothi I., Choi C.-J. Optical, morphological and electrical properties of rapid thermally annealed CoPc/n-Ge heterostructures for photodiode applications. *Materials Science and Engineering: B*. 2024. Vol. 300. P. 117102. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.117102>
11. Alam S., Lee J. Progress and Future Potential of All-Small-Molecule Organic Solar Cells Based on the Benzodithiophene Donor Material. *Molecules*. 2023. Vol. 28, № 7. P. 3171. <https://doi.org/10.3390/molecules28073171>
12. Kumar A., Vashistha V. K., Das D. K. Recent development on metal phthalocyanines based materials for energy conversion and storage applications. *Coordination Chemistry Reviews*. 2021. Vol. 431. P. 213678. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213678>
13. Lai H., Li X., Li S., Chen Y., Sun B., Jiang Q., Yang J. Enhancement of photovoltaic performance and moisture stability of perovskite solar cells by modification of tin phthalocyanine (SnPc). *Electrochimica Acta*. 2019. Vol. 296. P. 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.10.087>
14. Nofil M., Raza E., Aziz F., Supangat A., Abbas N. Optimizing small molecule-based organic solar cells with metal phthalocyanines for enhanced efficiency and stability. *Inorganic Chemistry Communications*. 2025. Vol. 173. P. 113812. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113812>
15. Ari M., Kanat Z., Dinçer H. Design, computational screening and synthesis of novel non-peripherally tetra hexylthio-substituted phthalocyanines as bulk heterojunction solar cell materials. *Solar Energy*. 2016. Vol. 134. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.041>
16. Mykola O., Semenenko, Sergii O., Kravchenko, Nadiia V., Siharova, Olha V., Pylypova, Mariya I., Terets, Oleksandr S., Pylypchuk, Mariia V., Voitovych, Tetiana Yu., Obukhova, Taisiia O., Kuzmenko, Andrey Sarikov Dispersed multi-walled carbon nanotubes in polyvinyl butyral matrix for transparent ionic conductive films <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.07584>
17. Priscilla P et al Effect of carbon dots on tuning molecular alignment, dielectric and electrical properties of a smectogenic cyanobiphenyl-based liquid crystal material 2024 J. Phys. D: Appl. Phys. 57 355302 DOI 10.1088/1361-6463/ad4a84
18. Rani V. et al. Charge transport mechanism in copper phthalocyanine thin films with and without traps. *RSC Advances*. 2017. Vol. 7, Iss. 86. P. 54911–54917. doi:10.1039/c7ra08316e.
19. Baba S., Suzuki A., Oku T. Electronic structures and magnetic/optical properties of metal phthalocyanine complexes. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1709. 020012. doi: 10.1063/1.4941211.
20. Semenenko et. all. *J. Appl. Phys.* 128, 114302 (2020); doi: 10.1063/5.0020527

Семененко М.О., Обухова Т.Ю., Коваль В.М., Кравченко С.О., Чопик В.В., Саріков А.В.
ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОСТРУКТУР З ШАРАМИ ФТАЛОЦІАНІНІВ
ДЛЯ ФОТОВАЛЬТІЙНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

У статті досліджено електрофізичні властивості гетероструктур на основі пористого кремнію з нанесеними шарами фталоціанінів міді та свинцю, що є перспективними органічними матеріалами для фотовольтаїки нового покоління. Актуальність дослідження зумовлена пошуком недорогих, гнучких та стабільних органічних фотоперетворювачів, здатних доповнити або замінити традиційні кремнієві сонячні елементи. Отримання пористого шару здійснювали методом метал-стимульованого травлення, після чого на підготовлену поверхню наносили розчини CuPc та PbPc у ДМСО. Електрофізичні характеристики досліджували за допомогою імпедансної спектроскопії та

вимірювання DC BAX. Показано, що гетероструктури демонструють випрямляючу поведінку, проте механізми провідності істотно залежать від виду центрального металу у макроциклі. Для структури *por-Si/CuPc* виявлено три характерні області провідності, що відповідають термічно-польовій емісії, рекомбінаційним процесам у області просторового заряду та лімітації струму послідовним опором. У випадку *por-Si/PbPc* встановлено домінування послідовного опору вже за наднизьких напруг (понад 0.006 В), що свідчить про формування високоомного інтерфейсу та гірші транспортні властивості порівняно з *CuPc*. Наведене в статті молекулярне моделювання *CuPc* і *PbPc* показало, що комплекс свинцю є суттєво непланарним через значно більший іонний радіус Pb^{2+} , тоді як *CuPc* зберігає плоску конформацію. Неplanарність *PbPc* зумовлює збільшення внутрішньої напруги в молекулі та погіршення енергетичного вирівнювання на гетеропереході, що корелює зі спостереженою високою величиною послідовного опору. Аналіз частотної залежності провідності підтвердив домінування дрейфового механізму транспорту заряду до частот 10^6 рад/с для обох структур. Отримані в статті результати демонструють критичну роль центрального металу у формуванні енергетичних бар'єрів і транспортних властивостей гетероструктур *por-Si/McPc* та визначають *CuPc* як більш придатний матеріал для створення ефективних органічно-неорганічних фотоперетворювачів.

Ключові слова: плівки метал-фталоціанінів, макроцикл, органічний гетеропереход, пористий кремній, вольт-амперні характеристики.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Shtykalo O.V.National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**Yamnenko I.S.**National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ELECTRONIC TRAFFIC MONITORING SYSTEM BASED ON BLUETOOTH TECHNOLOGY

*The article presents an approach to the development of urban **electronic** traffic monitoring systems based on Bluetooth Low Energy (BLE) technology. The purpose of the study is to design and experimentally validate a hardware and software complex capable of providing marked tracking of traffic participants without using or transmitting users' personal data. Unlike traditional monitoring methods (GPS, Wi-Fi, cellular networks, computer vision), BLE combines informativeness with privacy protection, energy efficiency, and the possibility of autonomous operation. The research was carried out by simulating an urban transport environment in the SUMO software with Bluetooth systems that register user device signals on a “reachability” basis at discrete time steps. To eliminate redundant MAC address records caused by users possessing multiple Bluetooth devices, Siamese neural networks with LSTM blocks and Batch Normalization were applied, enabling accurate grouping of signals belonging to the same user. The achieved grouping accuracy is 94.69%, while testing on different areas of Berlin and with other geographical coordinates (Madrid) showed a decrease in accuracy within 6–10%, confirming the model's generalization ability and robustness. To optimize the number of sensors and reduce infrastructure costs, the NSGA-II evolutionary multi-criteria algorithm was used, determining the optimal placement of Bluetooth systems and constructing a Pareto front of compromise solutions. The hardware implementation is based on an ESP32 microcontroller with integrated BLE and GSM modules and an MPPT controller, ensuring autonomous power supply, data acquisition, and reliable transmission to cloud storage. The obtained results provide a solid foundation for the practical deployment of BLE-based electronic traffic monitoring systems with predictable costs and controllable observation quality.*

Key words: BLE, neural network, LSTM, NSGA-II, SUMO, traffic monitoring, MAC address grouping, electronic system.

Formulation of the problem. Electronic systems for traffic monitoring and control are widely used in modern urban infrastructure, mobility management, and transport planning. They play a key role in collecting and processing primary data on the movement of road users. Their main function is to register signals through electronic nodes, integrate heterogeneous data sources, and perform computational processing for mobility analysis. The development of intelligent traffic management systems has led to the emergence of a wide range of technical solutions [1]. Extensive networks of measuring units, known as Roadside Units [2], are used to monitor traffic density, speed, and flow dynamics in real time. Monitoring systems based on GPS, cellular networks, Wi-Fi, Bluetooth, and video surveillance technologies are also widely implemented [3]. Each of these approaches has its

own limitations in terms of accuracy, cost, and infrastructure requirements. Scientific efforts are directed toward improving existing systems and developing new, more efficient methods capable of enhancing technical performance, reducing deployment costs, and protecting users' personal data, which may be exposed through unsecured communication channels.

This research is devoted to the development of an **electronic traffic monitoring system** based on passive Bluetooth scanning technology. Such an approach enables the collection of labeled mobility data without accessing or processing personal information, combining informativeness with confidentiality.

The article is structured as follows: Section 2 presents a review and comparison of modern data collection methods for traffic monitoring and justifies the use of Bluetooth technology. Section 3 describes the

research methodology and the design of the electronic system for data acquisition and transmission. Section 4 covers the simulation of the urban infrastructure, the neural network architecture for data processing, and the obtained results. Section 5 discusses the optimization of Bluetooth system placement using the NSGA-II multi-objective algorithm, which determines the compromise between the number of sensors and classification accuracy.

The novelty of the work lies in the integration of three components: BLE-based labeled data collection, grouping of MAC addresses using Siamese neural networks with LSTM blocks, and optimization of sensor placement using the NSGA-II algorithm.

Analysis of recent research and publications.

One of the most common approaches to traffic flow monitoring is the use of GPS data, which provide accurate real-time tracking of object locations. In studies [4, 5] clustering and Bayesian methods were proposed to identify modes of transport from anonymized trajectories. To improve classification accuracy, convolutional neural networks, autoencoders, and semi-supervised learning techniques are applied [6, 7]. Wi-Fi and Bluetooth data are used for passive monitoring based on signal analysis within coverage areas. Deep learning methods, such as ResNet [8], as well as velocity correction according to signal strength [9, 10], insure high accuracy in detecting movement modes. Cellular network data make it possible to assess large-scale mobility patterns, while route-matching algorithms [11] and LSTM (Long Short-Term Memory) models [12] improve accuracy under low sampling frequency. Inertial sensors of smartphones (accelerometers, gyroscopes) are used to recognize user activity (walking, running, cycling, or driving) based on motion analysis with deep and recurrent neural networks [13]. Computer vision methods, including aerial imaging within pNEUMA projects [14] achieve the highest spatial precision but require substantial computational resources and continuous spatial coverage.

A common feature of modern monitoring systems is the integration of artificial intelligence algorithms—primarily neural networks—which automatically extract informative features from heterogeneous data and ensure high classification accuracy even in complex urban environments.

The comparison of reviewed approaches shows that the high precision of GPS- or vision-based systems is associated with significant energy and infrastructure costs, whereas inertial smartphone sensors lack spatial reference. At the same time, most methods rely on personalized user data—GPS coordinates,

network records, or device telemetry—which creates the risk of identifying individual trajectories and limits the scalability of such systems. European regulators, including the European Data Protection Supervisor, emphasize the **Privacy by Design** principle, which requires ensuring data confidentiality already at the system development stage [15] [16].

Thus, in addition to technical requirements for accuracy and scalability, one of the key criteria of modern transport monitoring systems is privacy protection. This highlights the need for technologies capable of maintaining data label integrity while avoiding the identification of individual users.

A promising solution to the described limitations is **BLE** technology, which records only MAC addresses and signal parameters, significantly reducing the amount of sensitive data. Although even temporary addresses do not guarantee complete anonymity [17], BLE provides the best balance between traceability and privacy protection. Its passive nature allows data collection without user involvement or the installation of dedicated applications, making BLE a suitable foundation for urban monitoring systems.

At the same time, passive BLE scanning introduces the problem of redundant records, when the number of detected devices exceeds the actual number of users. Unlike Bluetooth Classic, which relies on direct connections, BLE only captures broadcast signals, so a single user may appear as multiple MAC addresses. In Europe and North America, more than 90% of users have smartphones, about 20% own smartwatches, and over 30% use wireless headphones, which can generate up to three independent signals [18]. This leads to data fragmentation that requires **grouping of BLE signals belonging to devices of the same user**. Such grouping enables an accurate estimation of the number of traffic participants without direct access to their devices.

The accuracy of this process depends not only on the applied algorithms but also on the network configuration – namely, the number and spatial distribution of BLE nodes. An excessive number of sensors increases costs and data volume, whereas insufficient coverage reduces observation completeness and grouping accuracy.

Task statement. Therefore, this study aims to develop an electronic traffic monitoring system that combines BLE-based data collection, signal grouping using Siamese neural networks with LSTM blocks, and infrastructure optimization through the NSGA-II multi-objective algorithm. The goal is to determine the optimal configuration of BLE nodes that ensures sufficient accuracy of user grouping while minimiz-

ing the number of sensors and data redundancy. The proposed system was evaluated in the SUMO simulation environment [24], which models realistic traffic processes in urban conditions.

Methodology

The traffic monitoring study was carried out by modeling an urban infrastructure and simulating transport flows in the SUMO environment [19]. Bluetooth systems were placed on the map to serve as receivers of signals from users' Bluetooth devices. The simulation did not explicitly model radio-wave propagation. Instead, a simplified approach was implemented: at each simulation step, the Euclidean distance between a Bluetooth receiver and a user was calculated. If this distance was less than the device's operating radius, the signal was considered detected. This method made it possible to emulate the "transmit–receive" process without complex physical modeling while maintaining sufficient accuracy for urban scenarios. The placement of antennas was automated using a custom script that calculated installation coordinates and inserted them into the simulation map. Each traffic participant was assigned a random number of Bluetooth devices with a specified detection radius, allowing various user behavior patterns to be represented. During the simulation, registered MAC addresses were recorded in a database together with timestamps and the identifiers of the detecting antennas for further processing.

Description of the Structural Scheme. The core of the Bluetooth monitoring system (Fig. 1) is a high-performance ESP32 microcontroller [20] that supports Wi-Fi 802.11 b/g/n, dual-mode Bluetooth 4.2, and multiple peripheral interfaces. Compared with the previous ESP8266, it features a dual-core processor with a clock frequency of up to 240 MHz (depend-

ing on the model). ESP32 supports both Bluetooth Classic and BLE: the former offers higher data rates but greater energy consumption, while BLE provides lower throughput yet enables energy-efficient, connection-free communication suitable for IoT and short-range mobile devices.

The controller's power consumption during active operation is 95–130 mA [21]. For autonomous deployment, the system uses a 3.7 V Li-Po battery (20 Ah) charged by a solar panel via an MPPT (Maximum Power Point Tracking) controller. A temperature sensor with a resistive heater maintains the battery within its operating range. Data transmission to the cloud is handled by the SIM800C GSM module (350–500 mA in transmission mode) [22]. The system performs adaptive scanning – increasing the frequency of Bluetooth detections during peak traffic and reducing it when activity is low. Data are transmitted periodically based on the accumulated volume and battery level, ensuring energy efficiency and several days of autonomous operation even under low solar conditions.

Depending on the deployment environment, the system can operate in three configurations:

- **Autonomous:** solar-powered with GSM data transmission via SIM800C;
- **Connected:** powered by the city grid with data transmission over LAN or the ESP32 Wi-Fi module;
- **Upgraded:** integration of existing Bluetooth-equipped devices through firmware updates for unified network operation.

Collected data in JSON format include the MAC address, timestamp, and ID of the detecting node. Depending on configuration, transmission occurs via GSM or local networks; in the cloud, system IDs are converted to geographic coordinates. The processed

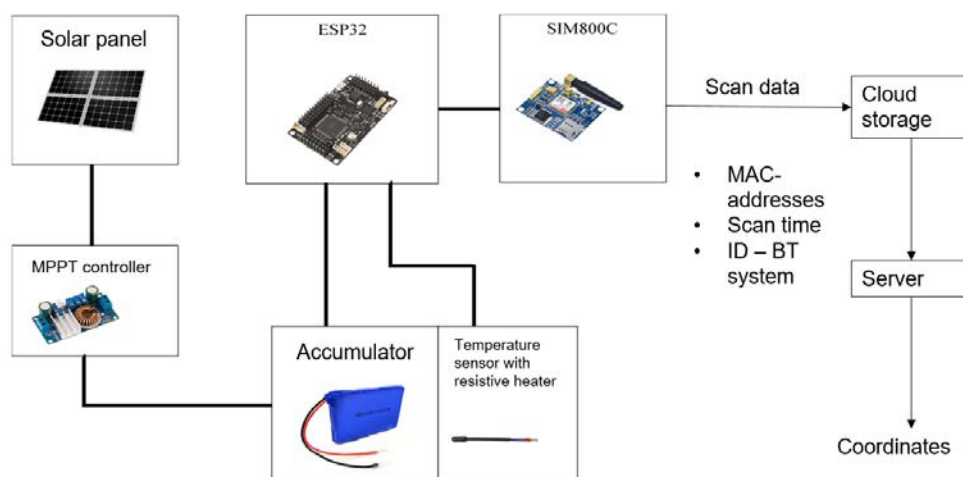


Fig. 1. Structural diagram of an autonomous Bluetooth system for monitoring road users

data are then supplied to the neural network for further grouping. The system's operation algorithm was validated through urban-traffic simulation in the SUMO software environment.

Description of the SUMO Simulation. Eclipse SUMO is an open-source traffic simulation package that models multimodal transport systems, including vehicular, public, and pedestrian flows. Developed by the German Aerospace Center, SUMO provides a comprehensive set of tools for importing road networks, route generation, visualization, and traffic-impact analysis. A key feature of SUMO is its extensible architecture that allows user-defined models and API integration with external systems [19].

For the simulated Bluetooth systems, an XML configuration file was generated containing the coordinates and identifiers of each receiver. These systems do not affect vehicle behavior in the simulation but act as reference points for registering Bluetooth devices, enabling the collection of additional mobility data. A fragment of the simulated city map with deployed Bluetooth systems is shown in Figure 2.



Fig. 2. Placement of Bluetooth systems in the SUMO simulation environment

Simulation results were exported in CSV format for subsequent processing by the neural network.

Artificial Neural Network for Data Processing. To process Bluetooth scanning data, several neural network architectures were developed and tested using a Siamese configuration [23]. Each Siamese model consists of two identical subnetworks sharing weights that generate feature vectors for two MAC addresses. The Euclidean distance between these vectors is computed, and the output neuron with a sigmoid activation evaluates the probability that both signals belong to devices of the same user [24].

Two model groups were designed: fully connected networks (NN1–NN4) and LSTM-based networks (LSTM1–LSTM4), each receiving 1,200 input features (400 time steps $\times$ three parameters – scan indicator and antenna coordinates).

The fully connected models differ in preprocessing and optimization methods:

- NN1: standardized input data with the Adam optimizer;
- NN2: same as NN1, but with additional L2 regularization;
- NN3: without data standardization, preserving spatial context.
- NN4: identical to NN3 but trained with the RMSprop optimizer.

The LSTM-based variants incorporate 64 recurrent neurons in different configurations:

- LSTM1: standard unidirectional LSTM layer;
- LSTM2: bidirectional LSTM, processing sequences in both temporal directions;
- LSTM3: one-dimensional convolutional layer (Conv1D) followed by MaxPooling, reducing dimensionality while preserving key temporal features;
- LSTM4: similar to LSTM1 but followed by Batch Normalization, improving training stability and reducing overfitting.

All models end with 32 dense neurons, a layer computing the Euclidean distance, and a single output neuron with a sigmoid activation. The LSTM4 model achieved the highest classification accuracy among all tested architectures.

Training was conducted on data simulated for an 8 km² fragment of Berlin with a 50 m grid step (Fig. 2). The model included 3,100 objects (1,440 vehicles and 1,660 pedestrians), each assigned 1–5 unique MAC addresses with transmission ranges of 10–30 m. The simulation lasted 2,000 seconds with a 5 s scanning step, producing 1,200 input features per record (scan indicator and antenna coordinates).

Balanced 1:1 positive–negative MAC address pairs were formed to prevent model bias: positive pairs corresponded to devices of the same user, negative pairs – to different users. Model performance was evaluated using the confusion matrix (TP, TN, FP, FN) and the classification accuracy metric:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}.$$

The classification accuracy metric of neural networks is displayed in Table 1.

The **LSTM4** configuration, which integrates Batch Normalization after the LSTM layer, demonstrated the best accuracy of 0.9469, confirming its superior generalization and training stability.

To further test robustness, the trained LSTM4 model was evaluated under three simulation scenarios: (1) the same Berlin area with antennas spaced **100 m apart**, which reduced accuracy due to lower spatial coverage (**0.89**); (2) another Berlin district (same

Table 1

Performance accuracy of neural networks

NN version	NN1	NN1	NN1	NN1	LSTM1	LSTM1	LSTM1	LSTM1
Accuracy	0.8718	0.8718	0.9114	0.8132	0.9416	0.9437	0.9448	0.9469

Table 2

Results of neural network accuracy under different simulation conditions

Distance between BT systems and the city	50 m, Berlin	100 m, Berlin	100 m, Berlin (different area)	100 m, Madrid (different coordinates)
Accuracy	0.9469	0.89	0.85	0.88

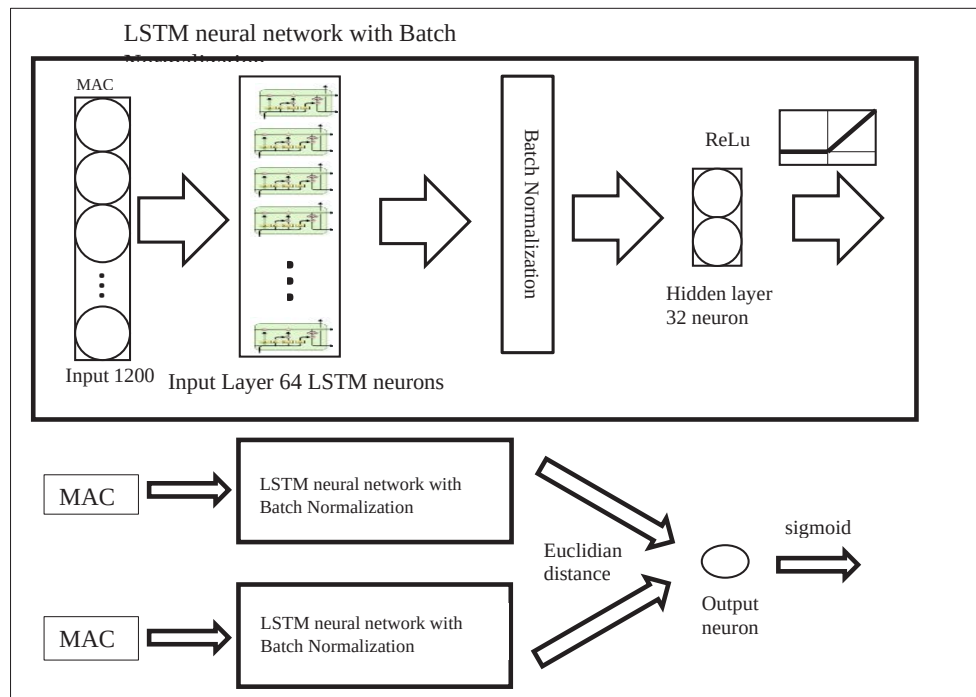


Fig. 3. Siamese neural network model with LSTM neurons and BatchNormalization

parameters, **0.85** accuracy), showing stability under local topology changes; and (3) **Madrid**, a different city with 14 km² area and 100 m spacing, achieving **0.88 accuracy**, confirming cross-city generalization. The results of all tests are shown in Table 2.

These results show that classification accuracy depends not only on model architecture but also on sensor density and placement. Reducing node density decreases the number of simultaneously detected devices, limiting temporal correlation patterns and overall accuracy. This emphasizes the need for optimal sensor placement to balance coverage, cost, and data quality.

Optimization of Bluetooth System Placement Using NSGA-II. Initial modeling in SUMO was carried out with Bluetooth systems uniformly placed on a grid with a 50 m spacing over an 8 km² area, resulting in 3,360 nodes (≈ 400 per km²). Although this configuration provided full coverage, more than half of the systems registered less than 1%

of scans, making it economically inefficient and motivating placement optimization.

The problem was formulated as a multi-objective optimization:

$$\vec{F}(\theta) = (f_1(\theta), -f_2(\theta)), \min \vec{F}(\theta),$$

where θ – vector of filtering parameters (activity, distance), f_1 – number of Bluetooth systems, f_2 – grouping accuracy. Optimization was performed using the NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) [25], which enables simultaneous minimization of sensor count and accuracy loss. The algorithm constructs a Pareto front of compromise solutions between conflicting objectives – minimizing infrastructure while maximizing classification accuracy.

For each configuration, a two-step filtering was applied:

- **Activity filtering** – removing low-activity systems according to

$$\frac{q}{q_{max}} < q_f,$$

where q is the scan count of the current system, q_{max} is the maximum, and q_f is the activity threshold.

• **Distance filtering** – eliminating systems located too close:

$$D = d_{base} - \alpha \cdot \left(\frac{q}{q_{max}} \right),$$

where D is the minimum allowed distance, d_{base} is the base spacing, and α is the sensitivity coefficient. If two systems are closer than D , the one with higher activity is retained. If two systems are closer than D , the one with higher activity is retained.

The parameters were varied as follows:

- $d_{base} = 50\text{--}500$ m (step 50 m);
- $\alpha = 0\text{--}450$ m (step 50 m);
- $q_f = 0\text{--}0.3$ (step 0.01).

The resulting Pareto front (Fig. 4) includes configurations that balance **sensor density and grouping accuracy**.

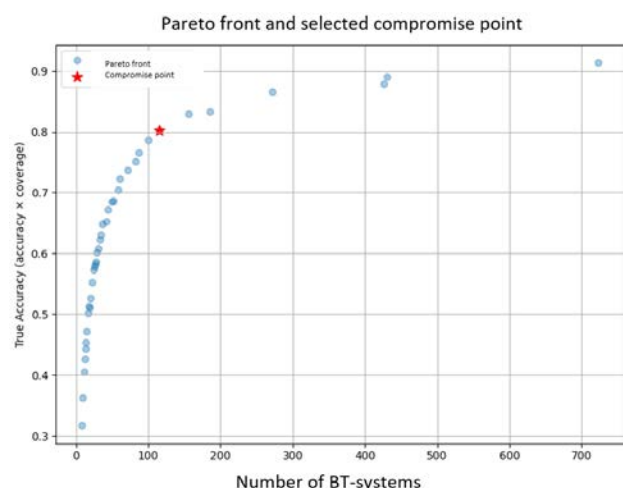


Fig. 4. Optimization result with Pareto front and compromise point

The compromise point, closest to the ideal (minimum number of systems at maximum accuracy), corresponds to 115 Bluetooth systems (~ 14 per km^2) with an accuracy of 0.803. This means the number of antennas was reduced by 96.6% (from 3,360 to 115), while grouping accuracy decreased only by $\approx 15\%$ (from 0.9469 to 0.803).

Thus, applying the NSGA-II algorithm enabled a substantial reduction in the hardware infrastructure without significant degradation of performance, achieving an effective balance between sensor count, deployment cost, and grouping accuracy of BLE signals.

Conclusions. The study confirmed the feasibility of using BLE technology for urban electronic traffic monitoring systems. BLE enables tagged tracking of mobility without accessing personal data, combining informativeness with privacy compliance. The key issue of users having multiple devices, which leads to redundant detections, was addressed through MAC-address grouping using Siamese neural networks with LSTM blocks and Batch Normalization, achieving a grouping accuracy of 94.69%. Testing in different simulated environments, including various geographical coordinates, showed only a 6–10% decrease in accuracy, confirming the model's generalization capability. Simulation in SUMO validated the applicability of the proposed approach for system-level evaluation. To optimize sensor deployment, the NSGA-II multi-objective evolutionary algorithm reduced the number of Bluetooth systems from 3,360 to 115 (≈ 14 per km^2) while maintaining acceptable accuracy (0.803), equivalent to a 96.6% reduction in infrastructure with only a 15% quality loss. The proposed integration of BLE data acquisition, neural grouping, and multi-criteria optimization provides a foundation for scalable, cost-predictable urban traffic monitoring systems with controllable observation quality.

Bibliography:

1. Thabit A. S., Kerrache C. A., Calafate C. T. A survey on monitoring and management techniques for road traffic congestion in vehicular networks. *ICT Express*. 2024. Vol. 10, No. 6. P. 1186–1198. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2024.10.007>
2. U.S. Department of Transportation. Roadside Unit (RSU) Standard. September 2022. URL: <https://www.ite.org/ITEORG/assets/File/Standards/CTI%204001v0101-amended.pdf>
3. Kheder M. Q., Ali M. A. Real-time traffic monitoring system using IoT-aided robotics and deep learning techniques. *Kuwait Journal of Science*. 2024. Vol. 51, No. 1. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.10.017>
4. Dabiri S., Lu C.-T., Heaslip K., Reddy C. K. Semi-supervised deep learning approach for transportation mode identification using GPS trajectory data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2896985>
5. Bachir D., Knodabandelou G., Gauthier V., El Yacoubi M., Vachon E. Combining Bayesian inference and clustering for transport mode detection from sparse and noisy geolocation data. In: *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10997-4_3
6. Hosseini S. H., Gentile G., Bresciani L. M., Viti F., Pourkhosro S. Deep neural networks for identifying modes of transport using GPS data. In: *IEEE Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) / Industrial and Commercial Power Systems Europe (I&CPS Europe)*. Rome, Italy, 2024. <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751099>

7. Li Z., Xiong G., Wei Z., Lv Y., Anwar N., Wang F.-Y. A semisupervised end-to-end framework for transportation mode detection using GPS-enabled sensing devices. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9, No. 10. P. 7842–7852. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3115239>
8. Kalatian A., Farooq B. A semi-supervised deep residual network for mode detection in Wi-Fi signals. *Journal of Big Data Analytics in Transportation*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s42421-020-00022-z>
9. Pu Z., Cui Z., Tang J., Wang S., Wang Y. Multimodal traffic speed monitoring: A real-time system based on passive Wi-Fi and Bluetooth sensing technology. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9, No. 14. P. 12413–12424. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3136031>
10. Huang Z., Mireles de Villafranca A. E., Sipetas C. Sensing multi-modal mobility patterns: A case study of Helsinki using Bluetooth beacons and a mobile application. In: *IEEE International Conference on Big Data*. Osaka, Japan, 2022. <https://doi.org/10.1109/BigData55660.2022.10020578>
11. Zhagyparova K., Bader A., Kouzayha N., Eisawy H., Al-Naffouri T. Transportation mode recognition based on cellular network data. In: *IEEE International Conference on Smart Mobility (SM)*. Thuwal, Saudi Arabia, 2023. <https://doi.org/10.1109/SM57895.2023.10112273>
12. Gou X., Hung C.-C., Li G., Peng W.-C. PTGF: Public transport general framework for identifying transport modes based on cellular data. In: *20th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/MDM.2019.00120>
13. Tang Q., Jahan K., Roth M. Deep CNN-BiLSTM model for transportation mode detection using smartphone accelerometer and magnetometer. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Aachen, Germany, 2022. <https://doi.org/10.1109/IV51971.2022.9827275>
14. Barmounakis E., Geroliminis N. On the new era of urban traffic monitoring with massive drone data: The pNEUMA large-scale field experiment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020. Vol. 113. P. 50–71. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.11.023>
15. Sterling B. Spime watch: Intelligent transport systems raise privacy concerns. *Wired*. July 30, 2009. URL: <https://www.wired.com/2009/07/spime-watch-intelligent-transport-systems-raise-privacy-concerns/>
16. European Data Protection Supervisor. Road safety and privacy. May 2, 2023. URL: https://www.edps.europa.eu/press-publications/press-news/press-releases/2023/road-safety-privacy_en
17. Becker J. K., Li D., Starobinski D. Tracking anonymized Bluetooth devices. *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies*. 2019. Vol. 2019, No. 3. P. 50–65. <https://doi.org/10.2478/popets-2019-0036>
18. Pangarkar T. Smart wearables statistics 2025 by devices, technology, usage. *Market.us Scoop*. January 2025. URL: <https://scoop.market.us/smart-wearables-statistics/>
19. Eclipse Foundation. About Eclipse SUMO. URL: <https://eclipse.dev/sumo/about/>
20. Espressif Systems. ESP32 series of modules. URL: <https://www.espressif.com/en/products/modules/esp32>
21. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet Version 4.8. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
22. SIMCom. SIM800C Hardware Design V1.04. July 2016. URL: https://www.mini-tech.com.ua/download/datasheet/communications/SIM800C_Hardware_Design_V1.04.pdf
23. Siamese Neural Network in Deep Learning. *GeeksforGeeks*. July 11, 2024. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/siamese-neural-network-in-deep-learning/>
24. Nag R. A comprehensive guide to Siamese neural networks. *Medium*. November 19, 2022. URL: <https://medium.com/@rinkinag24/a-comprehensive-guide-to-siamese-neural-networks-3358658c0513>
25. Deb K., Pratap A., Agarwal S. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6, No. 2. P. 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>

Штикало О.В., Ямненко Ю.С. ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ДОРОЖНЬОГО ТРАФІКУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ BLUETOOTH

У статті розглянуто підхід до побудови міських електронних систем моніторингу дорожнього трафіку на основі технології Bluetooth Low Energy (BLE). Метою дослідження є розроблення апаратно-програмного комплексу, здатного забезпечити марковане відстеження переміщення учасників руху без залучення персональних даних користувачів. На відміну від традиційних методів (GPS, Wi-Fi, стільникові мережі, комп'ютерний зір), BLE поєднує інформативність із вимогами конфіденційності та низьким енергоспоживанням. Дослідження виконано шляхом симуляції міського середовища у програмі SUMO з розміщенням Bluetooth-систем, які реєструють сигнали пристроїв користувачів за принципом «досяжності» у часових кроках. Для усунення надлишкових записів MAC-адрес, зумовлених наявністю у користувачів кількох пристроїв, застосовано нейронні мережі сіамського типу з LSTM-блоками та Batch Normalization, що дозволило ідентифікувати приналежність сигналів одному користувачеві. Досягнута точність групування становить 94,69%, а тестування для різних ділянок міста Берлін та інших географічних координат (Мадрид) показало зниження точності в межах 6–10%, що підтверджує здатність моделі узагальнювати інформацію. Для оптимізації кількості сенсорів і скорочення вартості інфраструктури використано еволюційний багатокритеріальний алгоритм NSGA-II, який визначає оптимальне розміщення Bluetooth-систем і формує Парето-фронт компромісних рішень. Апаратна частина системи реалізована на мікроконтролері ESP32 із модулями BLE, GSM та контролером MPPT, що забезпечує автономне живлення, збір даних і передавання результатів у хмарне сховище. Отримані результати становлять основу для практичного впровадження BLE-базованих електронних систем моніторингу дорожнього руху з прогнозованими витратами та контрольованою якістю спостережень.

Ключові слова: BLE, SUMO, NSGA-II, LSTM, сіамські нейронні мережі, групування MAC-адрес, міські системи моніторингу трафіку, багатокритеріальна оптимізація.

Дата надходження статті: 27.10.2025

Дата прийняття статті: 16.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Відомості про авторів

Асєєва І.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-9678-2681>

Базан С.Г. – здобувачка вищої освіти кафедри електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0000-4474-8983>

Бараннік В.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0000-0002-2848-4524>

Барбаш В.А. – кандидат хімічних наук, професор, професор кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-7933-6038>

Баркалова Н.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного сервісу і логістики Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0002-9350-881X>

Березька К.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики Західноукраїнського національного університету, <https://orcid.org/0000-0002-9632-4004>

Білевський П.С. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, <https://orcid.org/0000-0002-9021-7822>

Близнюк О.М. – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри біотехнології, біофізики та аналітичної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <http://orcid.org/0000-0002-2595-8421>

Бойко О.В. – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, <https://orcid.org/0009-0001-3761-7528>

Бондарчук В.М. – старший викладач кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації імені професора Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка», <https://orcid.org/0000-0003-2793-8720>

Борисенко Т.М. – головний конструктор ТОВ «Агентство продажу активів», <https://orcid.org/0000-0002-0557-7322>

Боровік П.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, <https://orcid.org/0000-0002-5353-2022>

Бриль Д.Р. – аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0009-0009-6359-5156>

Бровін О.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-9064-1199>

Бровін О.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-9064-1199>

Валерко Р.А. – доктор сільськогосподарських наук, доцент, професор кафедри екології та природоохоронних технологій Державного університету «Житомирська політехніка», <https://orcid.org/0000-0003-4716-0100>

Варивода Ю.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри процесів та апаратів харчової інженерії Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, <https://orcid.org/0009-0008-2779-2366>

Варлан К.Є. – доцент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів + технології природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Науково-навчального інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0001-7888-2777>

Василенко І.В. – вчителька біології Комунального закладу «Харківський ліцей № 24 імені І.Н. Пилипенки Харківської міської ради», <https://orcid.org/0000-0001-5500-5659>

Вербицький В.Г. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-5717-0797>

Волохов О.О. – аспірант кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету, <https://orcid.org/0009-0009-3300-3455>

Волошин В.О. – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, <https://orcid.org/0009-0008-6906-6370>

Волошин В.С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплоенергетики, Приазовського державного технічного університету, <https://orcid.org/0009-0005-6809-6779>

Волощук В.В. – доктор філософії, молодший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0003-2120-3088>

Волянський С.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, <https://orcid.org/0000-0001-7922-0441>

Воробйова В.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <http://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

Воронець В.М. – доктор філософії, старший викладач кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-7793-3824>

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», <https://orcid.org/0009-0005-5714-2370>

Воронкін А.А. – доктор філософії, асистент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-8893-4400>

Габовда О.В. – старший викладач кафедри інженерії, технологій та професійної освіти Мукачівського державного університету, <https://orcid.org/0000-0003-3109-3425>

Герасимчук Л.О. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій Державного університету «Житомирська політехніка», <https://orcid.org/0000-0002-3166-5588>

Головенський В.В. – кандидат технічних наук, доцент Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, <https://orcid.org/0000-0002-2320-0895>

Гончаров О.А. – аспірант кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0004-3583-7537>

Гребінь О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-4180-1720>

Гуляєв В.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-4991-6250>

Даніва В.А. – здобувачка вищої освіти Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0009-0000-5343-8354>

Дерібо С.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-1790-9857>

Дідок В.Ю. – аспірант кафедри будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури, <https://orcid.org/0009-0003-8941-484X>

Душенюк П.В. – здобувачка вищої освіти кафедри електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0004-5510-5536>

Єніна І.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів Української державної льотної академії, <https://orcid.org/0000-0002-2122-7808>

Затхей К.О. – аспірант кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-5501-662X>

Захарчук В.Б. – аспірант кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету, <https://orcid.org/0009-0008-6493-8707>

Захарчук О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету, <https://orcid.org/0000-0002-4359-5644>

Здреник В.С. – кандидат економічних наук, доцент кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету, <https://orcid.org/0000-0003-3373-8485>

Карпенко А.О. – курсант Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0007-2618-2577>

Катрушенко Н.А. – старший викладач кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0003-4810-9649>

Кириленко Н.П. – старший викладач кафедри екології та природоохоронних технологій Державного університету «Житомирська політехніка», <https://orcid.org/0000-0001-7222-9320>

Кириллова В.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатація флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету, <https://orcid.org/0000-0003-0738-0408>

Кириллова О.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті Одеського національного морського університету, <https://orcid.org/0000-0002-3414-7364>

Кириченко О.П. – викладач Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, <https://orcid.org/0009-0006-4445-4057>

Кисельов В.Б. – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, <https://orcid.org/0000-0003-3437-2825>

Коваленко А.Л. – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0003-1496-6634>

Коваленко Ю.І. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-7523-8545>

Коваль В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-3898-9163>

Козловська Т.Ф. – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, <https://orcid.org/0000-0002-6106-5524>

Комаров В.О. – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, <https://orcid.org/0000-0002-4929-4527>

Корчевський Б.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0009-0004-3922-7701>

Костюк Т.А. – учениця 11-А класу Комунального закладу «Харківський ліцей № 24 імені І.Н. Пилипенка Харківської міської ради», <https://orcid.org/0000-0001-5605-7944>

Котенко О.В. – старший викладач кафедри безпеки життєдіяльності, екології та хімії Одеського національного морського університету, <https://orcid.org/0009-0007-5294-474X>

Котов Д.О. – доктор філософії, доцент кафедри автомобільної техніки Військової академії, <https://orcid.org/0000-0002-6775-5593>

Кошарний О.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0002-5969-4858>

Кравченко О.В. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету, <https://orcid.org/0009-0006-8833-3441>

Кравченко С.О. – кандидат хімічних наук, старший дослідник, старший дослідник Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України, старший дослідник Інституту фізики Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0002-5843-4755>

Кузьмінський В.Ю. – аспірант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів Науково-навчального інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0009-0000-0938-6235>

Лановий О.Т. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0002-0717-9870>

Лебедєв В.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-6934-2349>

Лебідь Є.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри логістики та проектного менеджменту Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0003-1794-8060>

Лебідь І.Г. – кандидат технічних наук, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0003-0707-4179>

Левенець Н.Ф. – асистент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-0984-7622>

Лещенко С.А. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0003-2918-9575>

Лисенко О.І. – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-7276-9279>

Лужанська Н.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0002-1271-8728>

Мадінов М.Л. – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, <https://orcid.org/0009-0005-5910-8774>

Мазуренко О.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних вузлів Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0001-5591-1790>

Максимов С.В. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту Криворізького національного університету, <https://orcid.org/0000-0002-9932-1511>

Максимова О.С. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту Криворізького національного університету, <https://orcid.org/0000-0001-7253-0105>

Малиновський В.В. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0009-0005-0028-356X>

Малогулко Ю.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-6637-7391>

Мамрош І.М. – аспірант кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету, <https://orcid.org/0009-0001-0784-1545>

Марченко В.П. – викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії, <https://orcid.org/0000-0001-5775-4477>

Мацкевич В.В. – аспірант кафедри телекомунікаційних систем та мереж Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, <https://orcid.org/0009-0005-6734-905X>

Мацуй А.М. – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0001-5544-0175>

Мельник О.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету, <https://orcid.org/0000-0001-9228-8459>

Мисов О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0009-0005-3770-2166>

Михалевський Д.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0001-5797-164X>

Мітіна Н.Б. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0002-5384-7040>

Мочук П.С. – здобувач вищої освіти кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0001-9409-5738>

Мулявка Д.О. – здобувачка вищої освіти кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0001-5388-4853>

Назарова А.П. – аспірант кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0001-7099-2023>

Наритник Т.М. – кандидат технічних наук, професор, директор спільного підприємства «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук національного прогресу», <https://orcid.org/0000-0001-8071-6356>

Нестерко А.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-7488-4214>

Обухова Т.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-6415-4461>

Одошевський О.С. – здобувач вищої освіти Мукачівського державного університету, <https://orcid.org/0009-0006-1966-9865>

Олійник Л.Л. – кандидат економічних наук, начальник відділу організації наукової діяльності Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, <https://orcid.org/0000-0002-8706-1329>

Остра Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-8245-2937>

Охрімчук О.Б. – аспірант кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-4024-8601>

Павленко О.І. – доктор філософії, старший викладач кафедри транспортного сервісу і логістики Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0002-6509-9406>

Паламарчук В.О. – аспірант кафедри телекомунікаційних систем та мереж Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, <https://orcid.org/0009-0007-9860-6885>

Пацева І.Г. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій Державного університету «Житомирська політехніка», <https://orcid.org/0000-0001-6271-7355>

Перетятко Ю.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-1397-8078>

Петрик Ю.М. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії, <https://orcid.org/0000-0003-4589-4282>

Петров Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільної техніки Військової академії, <https://orcid.org/0000-0001-5709-9986>

Пілічева М.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, <https://orcid.org/0000-0003-1733-7534>

Пристінський С.М. – асистент кафедри автомобільного транспорту Криворізького національного університету, <https://orcid.org/0009-0000-2387-6601>

Прокудін Г.С. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0001-9701-8511>

Прокудіна І.І. – старший викладач кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0002-6395-8596>

Радзівілов Г.Д. – кандидат технічних наук, професор, заступник начальника інституту з наукової роботи Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, <https://orcid.org/0000-0002-6047-1897>

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», <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>

Ревва К.В. – аспірант кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0000-0003-2385-2786>

Редько І.В. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-3121-1412>

Ремінь А.В. – аспірант кафедри підйомно-транспортних машин та інжинірингу портового технологічного обладнання Одеського національного морського університету, <https://orcid.org/0009-0009-7922-6371>

Рибак А.В. – доктор філософії, старший викладач спеціальної кафедри № 3 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-6411-9498>

Румянцева М.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0009-0006-5674-6428>

Сайко В.Г. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, <https://orcid.org/0000-0002-3059-6787>

Салада А.Т. – здобувачка вищої освіти Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0009-0002-2049-0281>

Саріков А.В. – доктор фізико-математичних наук, провідний дослідник, провідний дослідник Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України, доцент Інституту високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-9123-7203>

Селезньов М.Є. – кандидат технічних наук, доцент кафедри економіки та цифрового бізнесу Державного університету економіки і технологій, <https://orcid.org/0009-0009-6697-9358>

Селіванова Н.Ю. – старший викладач кафедри транспортних технологій Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0002-6971-8235>

Семененко М.О. – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0003-3885-8099>

Сікорська О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0001-7341-9724>

Сіран Р.В. – аспірант кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету, <https://orcid.org/0009-0006-8589-3750>

Скиба М.І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології Українського державного університету науки та технологій, <https://orcid.org/0000-0003-4634-280X>

Скиба Ю.М. – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології Українського державного університету науки та технологій, <https://orcid.org/0009-0005-9925-7758>

Скиданенко М.С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної інженерії Сумського державного університету, <https://orcid.org/0000-0002-0277-1867>

Скремінський В.К. – викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії, <https://orcid.org/0009-0007-0189-5044>

Соколова О.Є. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-6341-0195>

Станілога О.О. – ад'юнкт науково-організаційного відділу Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, <https://orcid.org/0009-0008-5031-3431>

Стеренчук С.М. – аспірантка кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну, <https://orcid.org/0009-0009-1924-0016>

Суворова Ю.О. – керівник проєкту клейових груп та герметиків продукції 3М компанії «ВІКО», <https://orcid.org/0009-0003-8764-5791>

Табачун М.О. – аспірант кафедри хімічної інженерії Сумського державного університету, <https://orcid.org/0009-0002-2548-4657>

Теглівець О.В. – аспірант кафедри електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка», <https://orcid.org/0000-0003-3880-2159>

Тептя В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-2792-0160>

Тимофєєв Є.М. – аспірант кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0006-0179-0472>

Тонкоглас Ю.В. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-3121-1412>

Трапезон К.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-5873-9519>

Тронь І.В. – здобувач вищої освіти Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0005-9732-1568>

Троценко Є.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>

Трубчанінова К.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортного зв’язку Українського державного університету залізничного транспорту, <https://orcid.org/0000-0003-2078-2647>

Тягній В.Г. – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, <https://orcid.org/000-0002-5151-9801>

Усенко А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0001-7467-6220>

Усов І.Л. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0001-5690-9446>

Фоменко Г.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, <https://orcid.org/0000-0001-8789-7575>

Форись С.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0001-7104-640X>

Царенко А.О. – старший викладач Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, <https://orcid.org/0000-0002-4810-8382>

Чепіль О.О. – асистент кафедри транспортних технологій Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0009-0006-3732-3307>

Черваков Д.О. – доцент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів + технології природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Науково-навчального інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0003-1521-9171>

Черваков О.В. – доктор технічних наук, професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, завідувач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Науково-навчального інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0002-1631-3592>

Чередніченко К.В. – доктор філософії з транспортних технологій, в.о. завідувача кафедри організації авіаційних перевезень Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-6341-0195>

Чопик В.В. – здобувач вищої освіти кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0009-7059-2674>

Чорна Н.А. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу термогазодинаміки енергетичних машин Інституту енергетичних машин і систем імені А.М. Підгорного Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0002-9161-0298>

Чорногор Н.О. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри конструкції повітряних суден, авіаційних двигунів та підтримання льотної придатності Української державної льотної академії, <https://orcid.org/0000-0001-9753-9245>

Чорногор Н.О. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри конструкції повітряних суден, авіаційних двигунів та підтримання льотної придатності Української державної льотної академії, <https://orcid.org/0000-0001-9753-9245>

Шевчук О.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету, <https://orcid.org/0000-0001-8283-4620>

Шелешей Т.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-7242-4107>

Шемет Т.М. – старший викладач кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Українського державного університету науки і технологій, <https://orcid.org/0009-0003-8742-1106>

Шкода В.О. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету, <https://orcid.org/0009-0000-8811-0391>

Шохін М.В. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету, <https://orcid.org/0009-0003-0870-3309>

Шпилька О.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-1391-4031>

Штикало О.В. – аспірант кафедри електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-1595-4427>

Шумило О.М. – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри суднових енергетичних систем і комплексів Одеського національного морського університету, <https://orcid.org/0000-0003-0574-1951>

Ямненко Ю.С. – доктор технічних наук, професор кафедри електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-9796-6420>

Яніцький А.А. – старший викладач Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, <https://orcid.org/0000-0001-5318-1915>

Ярошевський О.М. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії, <https://orcid.org/0000-0002-2608-8624>

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 6 2025

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

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 42,26. Ум. друк. арк. 49,99. Зам. № 0126/048

Підписано до друку 30.12.2025. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.