

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ**

**Державний вищий
навчальний заклад
«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
(ДВНЗ «ПДТУ»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***ВІСНИК
ПРИАЗОВСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ***

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Видається 2 рази на рік
з 1995 року**

Випуск 51

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2025

**MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE**

**State higher
educational institution
«PRIAZOVSKYI STATE
TECHNICAL UNIVERSITY»
(SHEI «PSTU»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***REPORTER
OF THE PRIAZOVSKYI
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY***

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

**Published twice a year,
since 1995**

Issue 51

Section: Technical sciences

Dnipro, 2025

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2025. Вип. 51. 353 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025>.

У збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень вчених вищого навчального закладу та провідних спеціалістів у галузі технічних наук, показаний їхній вклад у розвиток науки та сучасних технологій. Публікації видання зберігаються на офіційному сайті Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Іщенко А.О.

Angeliki G. Lekatou

**Hossam Ahmed Mohamed
Halfa**

Sergey Edward Lyshevski

Dmytro Makarchuk

Oleksandr Vrublevskiy

Азархов О.Ю.

Белоконь К.В.

Білоусов Є.В.

Булгаков М.П.

Бялобржеський О.В.

Головань А.І.

Грицук І.В.

Губинський М.В.

Єфременко В.Г.

Кириллова О.В.

Клецька О.В.

Ковалевська О.С.

Кухар В.В.

Лук'яненко А.О.

Мазур В.О.

Маменко П.П.

Онищенко О.А.

Парфененко Ю.В.

Петренко Т.Г.

Плахтій О.А.

Позорлецький Д.С.

Проніна О.І.

Прус В.В.

Пятикоп О.Є.

Саєнко Ю.А.

Симоненко Р.В.

Сілі І.І.

Тарандушка А.А.

Твердомед В.М.

Ткачов В.В.

Худяков І.В.

Чабак Ю.Г.

Чеберячко Ю.І.

Чупринов Є.В.

Шумило О.М.

Савенко О.С.

Сорокіна М.Є.

головний редактор, д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

Dr., PhD, University of Ioannina (UOI), Greece

Dr., PhD, Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt

Dr., PhD, Rochester Institute of Technology, New York, USA

PhD, Solent University, Southampton, UK

Dr., PhD, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Olsztyn, Poland

д-р мед. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет, Україна

д-р техн. наук, проф., Херсонська державна морська академія, Україна

канд. техн. наук, доц., Одеський національний морський університет, Україна

канд. техн. наук, доц., Одеський національний морський університет, Україна

д-р техн. наук, проф., Херсонська державна морська академія, Україна

д-р техн. наук, проф., Національна металургійна академія України, Україна

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

канд. техн. наук, доц., Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

д-р техн. наук, проф., «Технічний університет «Метінвест Політехніка»,

Україна

канд. техн. наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Національної академії наук України, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

доктор філософії, доц., Херсонська державна морська академія, Україна

д-р техн. наук, проф., НУ «Одеська морська академія», Україна

канд. техн. наук, доц., Сумський державний університет, Україна

канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, Україна

канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, Україна

канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, доц., КрНУ ім. Михайла Остроградського, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., Національний транспортний університет, Україна

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., Черкаський державний технологічний університет, Україна

канд. техн. наук, доц., Державний університет інфраструктури та техно-

логій, Україна

д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія, Україна

д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка», Україна

канд. техн. наук, доц., Державний університет економіки і технологій, Україна

д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет, Україна

відповідальний секретар, канд. техн. наук, ДВНЗ «ПДТУ», Україна

коректор, ДВНЗ «ПДТУ», Україна

Адреса: ДВНЗ «ПДТУ», проспект Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна.

Телефон редакції: (098) 480-24-03.

E-mail: vestnik.pgtu@gmail.com, vestnik_pgtu@pstu.edu (для надсилання статей).

Ідентифікатор в Реєстрі суб'єктів у сфері друкованих медіа – R30-02289, згідно з рішенням Нацради України з питань телебачення і радіомовлення від 21.12.2023 № 1821. Збірник входить до переліку наукових фахових видань (категорія «Б»), в якому можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт, згідно з Наказами Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020, № 886 від 02.07.2020. Видається два рази на рік.

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 3 від 30.06.2025 р.

ISSN 2225-6733 (Print), ISSN 2519-271X (Online)

© ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ»), 2025

ЗМІСТ

CONTENTS

Вітальне слово ректора ДВНЗ «ПДТУ», доктора економічних наук, професора Хаджинової Олени Вікторівни до читачів збірника

8

Welcome address from the rector of the SHEI «PSTU», Dr. Sc., professor Olena V. Khadzhynova to the readers of the journal

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY

Соколова Н.О., Хара Г.Л., Балалаєва О.Ю., Олевський В.І.
Розробка шаблонів користувацького інтерфейсу на основі патернів проектування

9

N. Sokolova, G. Khara, O. Balalaieva, V. Olevskyi
Development of user interface templates based on design patterns

Воротнікова З.Є.
Огляд баз даних при розробці програмного забезпечення для різних операційних систем

19

Z. Vorotnikova
Database review for software development across different operating systems

Проніна О.І., П'ятикоп О.Є., Перцев Є.А.
Розробка інструменту корекції кольорів для користувачів із порушенням кольоросприйняття

32

O.I. Pronina, O.Ye. Piatykov, Ye.A. Pertsev
Developing a color correction tool for users with color perception disorders

Л.О. Дан, Л.О. Трофімова
Погляд на різні аспекти використання штучного інтелекту в технічній творчості

40

L.O. Dan, L.O. Trofimova
A look at various aspects of using artificial intelligence in technical creativity

Т.О. Левицька, Л.Д. Котихова
Графові нейронні мережі та алгоритми PageRank у задачах прогнозування популярності хештегів у соціальних мережах

50

T.O. Levytska, L.D. Kotykhova
Graph neural networks and PageRank algorithms in the problems of predicting the popularity of hashtags in social networks

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTORIAL ENGINEERING

Лаврик В.П., Суглобов В.В., Шишкін В.В.
Оптимальні методи відновлення і зміцнення кернів клещевих захватів колодязних кранів

57

V.P. Lavryk, V.V. Suglobov, V.V. Shishkin
Optimal methods for restoration and strengthening of pliers' core grips of well crane

Попов С.В.
Лінійна оптимізація технологічних параметрів розгортання отвору втулки зубчастого редуктора

65

S.V. Popov
Linear optimization of technological parameters of gear reducer bushing hole reaming

Вовк В.О.

Дослідження впливу параметрів повітряного потоку на ефективність калібрування насіння у пневмосепараторі

72

V.O. Vovk

Study of the influence of airflow parameters on the efficiency of seed calibration in a pneumatic separator

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

**Чупринов Є.В., Кассім Д.О.,
Зайцев Г.А., Ляхова І.А., Малій Х.В.**

Термозміцнення залізородних окатишів на сталевих перфорованих подинах

79

**Ye.V. Chuprynov, D.O. Kassim,
G.L. Zaitsev, I.A. Liakhova, K.V. Maliy**

Thermal strengthening of iron ore pellets on steel perforated beds

**Семикін С.І., Голуб Т.С.,
Дудченко С.О., Вакульчук В.В.,
Прокопенко П.Г.**

Дослідження особливостей розповсюдження озону за кисневим струменем, створеного високовольтним електричним розрядом на виході з продувної фурми

86

**S.I. Semykin, T.S. Golub,
S.O. Dudchenko, V.V. Vakulchuk,
P.H. Prokopenko**

Study of the features of ozone propagation along an oxygen jet created by a high-voltage electric discharge at the outlet of a blowing lance

Крейцер К.О., Козишкурт Є.М.

Оптимізація параметрів лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском з урахуванням динаміки процесу пресування

94

K.O. Kreitser, Ye.M. Kozishkurt

Optimization of high-pressure die casting parameters for aluminum alloys considering pressing dynamics

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

Lysiak V.H., Dyda R.B.

Matematyczne modelowanie automatycznej stabilizacji ciśnienia głównych przepompowni z asynchronicznym napędem elektrycznym pomp odśrodkowych

102

V.H. Lysiak, R.B. Dyda

Mathematical modeling of automatic pressure stabilization of main pumping stations with asynchronous electric drive of centrifugal pumps

Саєнко Ю.А., Любарцева Ю.І.

Проблеми якості електроенергії при впровадженні фотоелектричних станцій в мережі 0,4 кВ

110

Yu. Sayenko, Yu. Liubartseva

Power quality issues associated with the integration of photovoltaic power plants into 0,4-kV distribution networks

Клюєв О.В.

Синтез спостерігача швидкості ротора в складі векторної системи керування машиною подвійного живлення

119

O. Kliuiev

Pressure blast melting and blow enrichment with oxygen – process intensifiers or an unfounded tribute to traditions

**Цицак Т.П., Семенова Н.В.,
Семенов А.О.**

Підвищення надійності розподільчого пристрою 220 кВ на тепловій електростанції шляхом модернізації

127

**T.P. Tsytsak, N.V. Semenova,
A.O. Semenov**

Enhancing the reliability of the 220 kV switchyard at a thermal power plant through modernization

Гошко М.О., Гошко М.М.*Вибір оптимального акумулятора для 10-дюймового FPV-дрона у цивільних місіях: аналіз енергоефективності та автономності (порівняння Molicel P42A 6S2P/3P/4P та LiPo 6S 10Ah)*

134

M.O. Hoshko, M.M. Hoshko*Selecting the optimal battery for a 10-inch FPV drone in civil missions: analysis of energy efficiency and autonomy (comparison of Molicel P42A 6S2P/3P/4P and LiPo 6S 10Ah)***Прокопенко С.О., Кривоносов В.Є., Кривоносов В.В., Савенко О.С.***Перспективи розвитку функціонального методу діагностування виткового замикання статорних обмоток електродвигуна при несиметрії напруг живлення*

141

S.O. Prokopenko, V.E. Kryvonosov, V.V. Kryvonosov, O.S. Savenko*Prospects for the development of a functional method for diagnosing the turn-to-turn short circuit of the stator windings of an electric motor in the event of supply voltage asymmetry***ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА****HEAT POWER ENGINEERING****Ялова А.М., Бондар Н.В.***Модернізація турбовітроудовк ТЕЦ: технічні аспекти заміни компресора*

150

A. Yalova, N. Bondar*Modernization of CHP turbo blowers: technical aspects of compressor replacement***Ленцов І.А., Умріхін М.О.***Напрями оптимізації роботи обертових печей*

160

I.A. Lentsov, M.O. Umrikhin*Areas of optimization of rotary kiln operation***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ****AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES****Сімкін О.І., Сокол С.П., Ісаєв А.Б., Койфман О.О.***Методи корегування поточних значень технологічних параметрів в автоматизованих системах керування*

174

O.I. Simkin, S.P. Sokol, A.B. Isaiev, O.O. Koyfman*Methods of correction of current values of technological parameters in automated control systems***Поливода В.В., Самойлов С.О.***Аналіз впровадження сучасних технологій для підвищення ефективності суднових електроенергетичних систем*

188

V.V. Polyvoda, S. Samoilov*Analysis of the implementation of modern technologies to increase the efficiency of ship electric power systems***Samoilov O.O., Simanenkou A.L.***Automation technologies in ship systems maintenance: problems and ways to improve through cross-sector experience*

197

O.O. Samoilov, A.L. Simanenkou*Automation technologies in ship systems maintenance: problems and ways to improve through cross-sector experience***БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ****BIOMEDICAL ENGINEERING****Козак Л.М., Романюк О.О., Коваленко О.С., Пезенцалі Г.О., Азархов О.Ю.***Метод збереження цифрових медичних зображень для подальшого використання в лікувально-діагностичному процесі*

208

L.M. Kozak, O.O. Romanyuk, O.S. Kovalenko, H.O. Pezentsali, O.Yu. Azarhov*Method of saving digital medical images for further use in the treatment and diagnostic process*

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**ENVIRONMENTAL PROTECTION
TECHNOLOGY**

Бакуліч О.О., Кухтик Н.О.

Оцінка впливу на довкілля як інструмент реалізації принципів сталого розвитку

216

O.O. Bakulich, N.O. Kukhtyk

Environmental impact assessment as a tool for implementing the principles of sustainable development

Волошин В.С., Бурко В.А.

Особливості мінімізації відходів у технологічному процесі виробництва хліба

223

V.S. Voloshyn, V.A. Burko

Features of waste minimization in the technological process of bread production

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

RIVER AND SEA TRANSPORT

**Агеев М.С., Дзигар А.К.,
Устінцев С.М.**

Методика проектування технологічного процесу відновлення розподільних валів судових двигунів зносостійкими покриттями

231

**M.S. Ahieiev, A.K. Dzygar,
S.N. Ustintsev**

Methodology for developing a technological process for restoration of camshaft of marine engines with wear-resistant coatings

**Nykytyuk P., Melnyk O., Koryakin K.,
Shchenyavskiy G.**

An integrated model of crew behavior factors incorporation into the ship's safety system

240

**P. Nykytyuk, O. Melnyk, K. Koryakin,
G. Shchenyavskiy**

An integrated model of crew behavior factors incorporation into the ship's safety system

**Томчаковський Г.Г., Капочкіна М.Б.,
Калініченко Є.В.**

Дослідження мінливості «мусонної депресії» у Бенгальській затоці

250

**G. Tomchakovsky, M. Kapochkina,
E. Kalinichenko**

Study of the variability of the «monsoon depression» in the bay of Bengal

Kucherenko V.

The impact of proactive ship handling on reducing the ship's vibration and hydroacoustic noise

263

V. Kucherenko

The impact of proactive ship handling on reducing the ship's vibration and hydroacoustic noise

**Грицук І.В., Худяков І.В.,
Погорлецький Д.С., Черненко В.В.,
Котов А.І., Задорожній В.К.**

Особливості оцінювання і прогнозування стану судових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників

275

**I.V. Gritsuk, I.V. Khudyakov,
D.S. Pogorletskyi, V.V. Chernenko,
A.I. Kotov, V.K. Zadorozhnii**

Features of assessment and prediction of the condition of ship heat exchangers in the operation system based on digital twin technology

АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

AIR TRANSPORT

Іващук О.Р., Остроумов І.В.

Оцінювання ризику зіткнень літаків під час польоту на маршпуті

291

O.R. Ivashchuk, I.V. Ostroumov

Risk calculation methodology in German airspace

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

RAILWAY TRANSPORT

**Фомін О.В., Прокопенко П.М.,
Климаш А.О., Кузьменко С.В.**
Дослідження міцності та динамічних
характеристик універсального ванта-
жного вагона мобільною системою

301

**O.V. Fomin, P.M. Prokopenko,
A.O. Klymash, S.V. Kuzmenko**
Research of the strength and dynamic
characteristics of a universal freight wagon
using a mobile system

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

ROAD TRANSPORT

Матейчик В.П., Навроцький А.В.
Особливості взаємодії засобів збирання і
обробки інформації в структурі апарат-
ного забезпечення інформаційних сис-
тем моніторингу експлуатації транс-
портних засобів

311

V.P. Mateichyk, A.V. Navrotskyi
Features of interaction between data ac-
quisition and processing tools in the hard-
ware structure of vehicle operation moni-
toring information systems

**Бурлака О.А., Келемеш А.О.,
Ляшенко С.В., Гончаренко О.О.**
Відновлення та удосконалення елемен-
тів гідравлічних насосів типу «НШ» за
допомогою пластичного деформування

321

**O.A. Burlaka, A.O. Kelemesh,
S.V. Liashenko, O.O. Honcharenko**
Restoration and improvement of elements
of hydraulic pumps of the type «NSH» using
plastic deformation

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ
(ЗА ВИДАМИ)**

**TRANSPORT TECHNOLOGIES
(BY TYPES)**

Sharko O., Doroshenko O.
Software and hardware tools for sea logis-
tics transportation in uncertainty condi-
tions

331

O. Sharko, O. Doroshenko
Software and hardware tools for sea logis-
tics transportation in uncertainty condi-
tions

Ібрагім А.М., Клевцов К.М.
Правові колізії в практиці організації
мультимодальних перевезень за учас-
тю морського транспорту: ризики та
управлінські наслідки в умовах надзви-
чайних ситуацій

340

A.M. Ibrahim, K.M. Klevtsov
Legal conflicts in the practice of organizing
multimodal transport involving sea car-
riage: risks and managerial consequences
in emergency situations

РАЗОМ – ЗНАЧИТЬ СИЛЬНІШІ

TOGETHER – STRONGER

Нарис, присвячений становленню, роз-
витку та досягненням двох старіших
кафедр ДВНЗ «ПДТУ» – кафедри теорії
металургійних процесів та ливарного
виробництва

350

An essay dedicated to the formation, de-
velopment, and achievements of two senior
departments of SHEI «PSTU» – the depart-
ment of metallurgical process theory and
the department of foundry production

ВІТАЛЬНЕ СЛОВО РЕКТОРА ДВНЗ «ПДТУ», ДОКТОРА ЕКОНОМІЧНИХ НАУК, ПРОФЕСОРА ХАДЖИНОВОЇ ОЛЕНИ ВІКТОРІВНИ ДО ЧИТАЧІВ ЗБІРНИКА

Шановні колеги!

Маю за честь звернутися до вас із щирим вітанням і представити новий випуск збірника наукових праць «Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки», приурочений до 95-річчя нашого університету.

За роки своєї роботи Приазовський державний технічний університет здобув визнання в Україні та за її межами. Тут поєдналися традиції технічної школи, інноваційний підхід і творча енергія викладачів, науковців і студентів, які щодня розвивають освіту, науку та виробництво.

Після вимушеного переїзду з рідного Маріуполя до Дніпра університет гідно витримав випробування часом. Ми зберегли свою спільноту, традиції, науковий потенціал і довели, що сила університету – не в стінах, а в людях, які вірять у справу, якій служать. Сьогодні ПДТУ продовжує готувати висококваліфікованих фахівців, проводити актуальні дослідження та робити внесок у відновлення й розвиток України.

Попри складні обставини, університет залишається відкритим до співпраці, модернізує освітні програми, розширює партнерство з підприємствами, закладами освіти та міжнародними організаціями. Ми створюємо умови для навчання, які відповідають сучасним викликам – поєднуємо традиційні підходи з цифровими технологіями, підтримуємо молодих науковців і сприяємо розвитку нових ідей.

Наш університет – це простір для тих, хто прагне знань і змін. Тут формуються нові ідеї, народжуються проекти, зростають професіонали, що прославляють ПДТУ в Україні та за її межами. Ми пишаємося досягненнями наших викладачів, студентів і випускників, які примножують добру славу університету в науці, промисловості, освіті та громадському житті.

Від щирого серця дякую всім, хто причетний до історії та сьогодення Приазовського державного технічного університету – колегам, партнерам, студентам і випускникам. Бажаю кожному наснаги, віри у власні сили та нових успіхів задля процвітання нашого університету й рідної держави!



З повагою,
Олена Хаджинова

122 КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.514+ 004.4'24

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344593

РОЗРОБКА ШАБЛОНІВ КОРИСТУВАЦЬКОГО ІНТЕРФЕЙСУ НА ОСНОВІ ПАТЕРНІВ ПРОЄКТУВАННЯ

Соколова Н.О.	канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2493-3553 , e-mail: n.olegowna@gmail.com ;
Хара Г.Л.	магістр, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1165-901X , e-mail: kharaherman@gmail.com ;
Балалаєва О.Ю.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1461-4399 , e-mail: balalaeva_e_u@pstu.edu ;
Олевський В.І.	д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3824-1013 , e-mail: olevskiy.v.i@nmu.one

Дана стаття присвячена дослідженню питання розробки шаблонів інтерфейсів із використанням патернів проєктування. Актуальність дослідження зумовлена постійним зростанням кількості програмних продуктів у різних сферах, що вимагає створення ефективних, гнучких та масштабованих архітектур. Розробка шаблонів користувацького інтерфейсу на основі патернів проєктування є багатогранною темою, яка охоплює адаптивність, спеціалізовані рішення, інтеграцію сучасних технологій і повторне використання існуючих рішень. Розглянуті джерела демонструють, як патерни можуть бути адаптовані до різних контекстів, від гейміфікації до аналізу зображень і метавесесвіту. Це підкреслює їхню універсальність і важливість у сучасному дизайні UI. Наведений опис трьох шаблонів інтерфейсів для різної взаємодії користувача з програмними продуктами, зокрема для кросплатформної програми з надзвичайною інформацією, рекламного застосунку та файлового редактора. Для кожного з них описано вибір патернів, ієрархію та взаємодію класів та особливості реалізації інтерфейсу. Дослідження показало, що використання породжувальних патернів проєктування Фабричний метод та Абстрактна фабрика, а також поведінкового патерну Команда, дозволяє значно підвищити гнучкість, масштабованість і підтримуваність програмних продуктів, а також сприяє скороченню часу розробки та підвищенню якості кінцевого продукту. Дана робота демонструє практичну цінність патернів проєктування для розробки сучасних, ефективних та зручних користувацьких інтерфейсів, а також підтверджує доцільність їх використання у реальних програмних проєктах. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів як діючими розробниками, так і студентами для створення ефективних, функціональних і зручних інтерфейсів, а також для поглибленого вивчення дисциплін, пов'язаних із патернами проєктування та архітектурою програмного забезпечення.

Ключові слова: інтерфейс користувача, патерни проєктування, ієрархія класів, Java, програмний продукт, шаблони інтерфейсу, кросплатформність.

Постановка проблеми

Щодня з'являється все більше нових розробників, які створюють різноманітне програмне забезпечення для бізнесу, освіти, медицини, спорту чи розваг. Найважливішим і найскладнішим етапом є розробка архітектури додатку. Протягом багатьох років розробники стикалися зі схожими проблемами під час проєктування, і з часом ці труднощі були систематизовані у вигляді патернів проєктування. З подачі «банди чотирьох»: Еріха Гамма, Річарда Хелма, Ральфа Джонсона, Джона Вліссідеса, які написали у 1994 році книгу «Шаблони проєктування: Елементи повторно використовованого об'єктно-орієнтованого програмного

забезпечення» (англ. «Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software»), патерни стали універсальними рішеннями для типових архітектурних задач, допомагають розширювати функціонал додатків, зменшують обсяг коду та дозволяють уникати типових помилок, навчаючись на досвіді інших.

Розробка шаблонів користувацького інтерфейсу (англ. User Interface, UI) на основі патернів проєктування є важливим напрямом у сучасному дизайні програмного забезпечення. Патерни проєктування забезпечують стандартизовані рішення для типових проблем, що виникають у процесі створення інтерфейсів. Вони дозволяють дизайнерам адаптувати готові шаблони під конкретні завдання та контекст проєкту, що

підвищує якість продукту і зменшує час розробки [1, 2]. Сучасні бібліотеки UI-патернів і дизайн-системи дозволяють швидко знаходити та впроваджувати найкращі практики, забезпечуючи високу якість та уніфікованість інтерфейсів у різних продуктах. Саме тому дослідження можливості впровадження патернів – це важлива складова професійної розробки шаблонів інтерфейсів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розробка шаблонів користувацького інтерфейсу на основі патернів проектування є ключовим підходом для створення ефективних, зручних і послідовних інтерфейсів. Патерни дизайну інтерфейсів – це повторювані рішення, які допомагають вирішувати типові проблеми взаємодії користувача з програмою або сайтом, забезпечуючи стандартизовані, перевірені часом методи [3-5].

Сьогодні разом зі стандартними патернами проектування розроблені та використовуються специфічні патерни для розробки інтерфейсів [1, 2, 6], які можуть використовуватися в різних контекстах розробки шаблонів UI.

У роботі [7] розглядаються патерни дизайну інтерфейсів для взаємодії між людьми та агентами (англ. Human-Agent Teaming, HAT). Автори виділили 25 патернів, які охоплюють такі аспекти, як планування, просторову орієнтацію, управління завданнями та комунікацію. Ці патерни можуть бути використані для створення мов дизайну HAT, що є корисним для розробників UI. Патерни для аналізу зображень з камеровою, які допомагають біологам ефективно класифікувати дані [8]. Цей підхід демонструє, як патерни можуть бути адаптовані до вузькоспеціалізованих завдань.

Адаптивні інтерфейси поєднані з сучасними технологіями. Автори [9] розглядають інтеграцію адаптивних інтерфейсів із хмарними мікросервісами та технологіями глибокого навчання. Система автоматично адаптується до змін потреб користувачів, використовуючи алгоритми оптимізації та аналіз поведінки.

У роботі [10] описано гейміфіковані інтерфейси для підвищення енергетичної грамотності користувачів. Використання інтерактивних елементів, таких як місії, досягнення та зворотний зв'язок, сприяє залученню користувачів і зміні їхньої поведінки.

Розробка шаблонів для різних платформ, наприклад, патерни для інформаційно-розважальних систем у транспортних засобах. У дослідженні [11] представлено дев'ять патернів для UI в автомобільних інформаційно-розважальних системах. Вони охоплюють аспекти контенту, стилю, взаємодії, сповіщень та скорочень. Ці патерни були розроблені на основі емпіричних даних, отриманих під час тестування користувачів, і враховують фактори, що впливають на досвід водія. У роботі [12] аналізується дизайн інтерфейсів для додатків цифрових колекцій у контексті метавесвіту.

Автори використовують інноваційні підходи до оптимізації візуальних ефектів, анімацій та інтерактивності.

Автори [13] пропонують методику відновлення патернів дизайну вебінтерфейсів із вихідного коду за допомогою регулярних виразів. Це сприяє повторному використанню та підтримці існуючих рішень.

Процес впровадження патернів у проєкт включає кілька етапів: ідентифікацію проблеми, аналіз ситуації, вибір принципу рішення, опис самого патерну, пояснення його користі, пошук прикладів успішного застосування та технічну інтеграцію у продукт [3]. Важливо також проводити тестування з реальними користувачами, щоб переконатися у зручності та ефективності обраних рішень [1, 6].

Мета статті

Метою даної роботи є аналіз підходів до розробки архітектури програмного забезпечення з використанням патернів проектування та підтвердження їхньої ефективності при розробці інтерфейсів програмних продуктів.

Виклад основного матеріалу

Дослідження можливості використання патернів проектування для розробки шаблонів інтерфейсів проводилось для трьох різних сценаріїв взаємодії користувача з програмним продуктом.

Перший сценарій – кросплатформна програма з «надзвичайною інформацією». Кросплатформний застосунок складається з трьох частин та дозволяє користувачу переглядати новини, мапу тривоги та мапу бомбосховищ (рисунок 1).

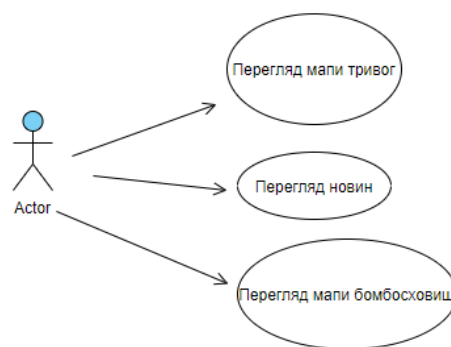


Рис. 1 – Діаграма взаємодії сценарію 1

Під час проектування системи було застосовано патерн «Фабричний метод» (англ. Factory Method), який визначає загальний інтерфейс створення об'єктів у базовому класі, дозволяючи дочірнім класам мати власну конкретну реалізацію цих об'єктів. Такий підхід дає змогу розробити систему, яка не потребує попередніх знань про те, який саме продукт потрібно створити. Це особливо корисно, коли необхідно

розширювати систему об'єктами з різною реалізацією, наприклад, для створення програм, що працюють на різних платформах.

Програма має десктопну та вебверсію. Для створення десктопного застосунку була обрана мова програмування Java з бібліотекою Swing. Java була обрана не випадково. По-перше, вона є кросплатформною, що дає можливість перенесення програм без перекомпілювання на інші операційні системи, і вже давно є однією з найвикористовуваних при розробці програм для інтернет. По-друге, це об'єктно орієнтована мова програмування, і, враховуючи специфіку використання патернів, засновану на взаємодії класів, використання Java дуже доцільне. Це дозволяє створювати модульні програми, вихідний код яких можна використовувати багаторазово. Swing у Java – це легкий інструментарій для створення графічних інтерфейсів, який входить до складу Java Foundation Classes і базується на AWT API. Він повністю написаний на Java, не залежить від платформи та має широкий вибір віджетів для розробки віконних додатків. Swing підтримує зміну дизайну компонентів, використовує архітектуру Model-View-Controller, споживає небагато ресурсів, забезпечує подвійну буферизацію та дозволяє налаштувати вигляд власних елементів інтерфейсу.

Для створення вебверсії кросплатформного застосунку було використано поєднання HTML, CSS та

JavaScript. HTML забезпечує структуру сторінки, є простим для редагування та легко інтегрується з іншими мовами, а також підтримується всіма браузерами. CSS відповідає за оформлення й дозволяє швидко змінювати дизайн на всіх сторінках, забезпечує послідовність вигляду та ефективне завантаження сайту. JavaScript забезпечує динамічну поведінку сторінки у взаємодії з користувачем.

Ієрархія та взаємодія класів наведена на рис. 2.

Клас GUI містить абстрактний фабричний метод `createInterface()`, який повертає загальний інтерфейс для конкретних продуктів і залишається абстрактним, щоб кожен конкретний фабричний клас міг реалізувати його відповідно до своїх завдань. Конкретні фабричні класи `WindowsGUI` та `HtmlGUI` створюють і об'єднують реалізації продуктів, представлені у класах `WindowsVersion` та `HtmlVersion`. Ці класи відповідають за різні варіанти інтерфейсу, але метод їх створення спільний, оскільки реалізує один і той же інтерфейс. Клієнтський код визначає операційну систему користувача і за допомогою умовного оператора `if` створює відповідний екземпляр класу з реалізацією інтерфейсу на Java або HTML-CSS-JS.

Для інтерфейсу був розроблений шаблон з трьома вкладками (рис. 3). Перша вкладка повинна показувати мапу тривоги України, друга вкладка відображає стрічку новин, на останній вкладці – карта бомбосховищ.

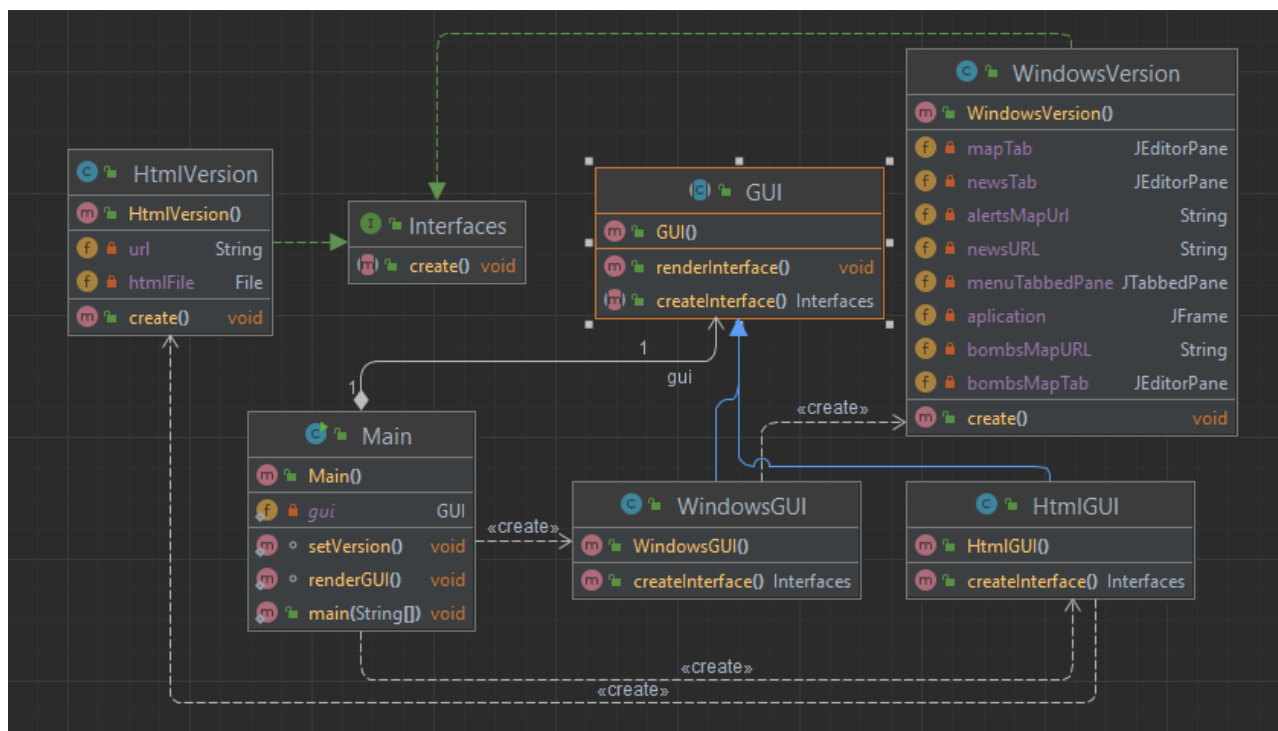


Рис. 2 – Діаграма класів сценарію 1



Рис. 3 – Шаблон вкладок застосунку

На основі патерну «Фабричний метод» та розроблених шаблонів був створений застосунок, який дозволяє переглядати інформацію як у Windows 11, так і через вебверсію. Для створення десктопного інтерфейсу використовувались елементи Java Swing: для створення вкладок JTabbedPane, для відображення контенту з сайтів JEditorPane, JFrame як основа всього застосунку. Реалізація вебінтерфейсу базується на контейнерах <div>, які переключуються за допомогою <button> з використанням JS та CSS. На рисунках 4 та 5 наведені реалізовані інтерфейси.

Було проведено ручне тестування розробленого застосунку, яке підтвердило працездатність обох розроблених інтерфейсів. Розроблений застосунок можна легко розширювати, наприклад, для мобільних гаджетів, як вебверсію, так і десктопну.

Другий сценарій взаємодії користувача з програмним продуктом – це десктопний рекламний застосунок для різних операційних систем, який демонструє рекламу та дозволяє обрати користувачу продукт з переліку та перейти на вебсторінку цього продукту. На рисунку 6 наведено діаграму взаємодії застосунку з користувачем.

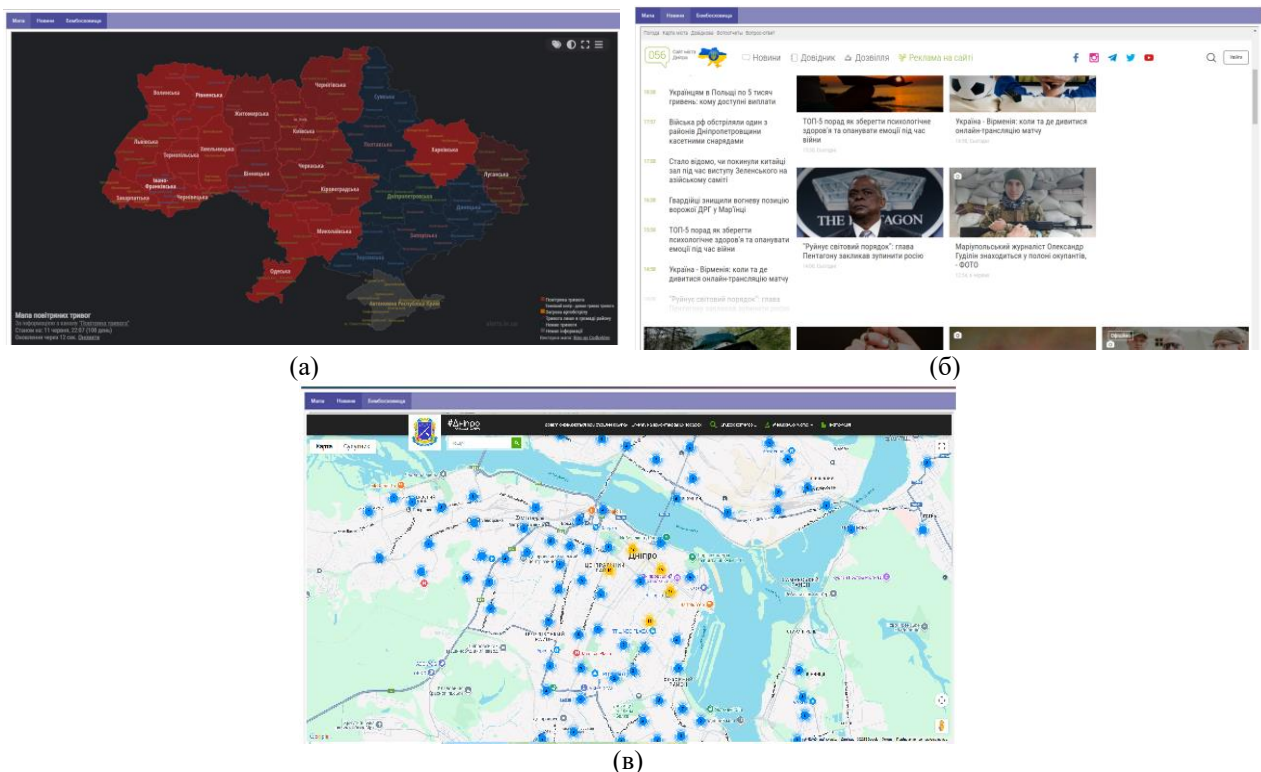


Рис. 4 – Реалізація HTML інтерфейсу: вкладка з мапою тривоги (а); вкладка з новинами (б); вкладка з бомбосховищами міста Дніпра (в)

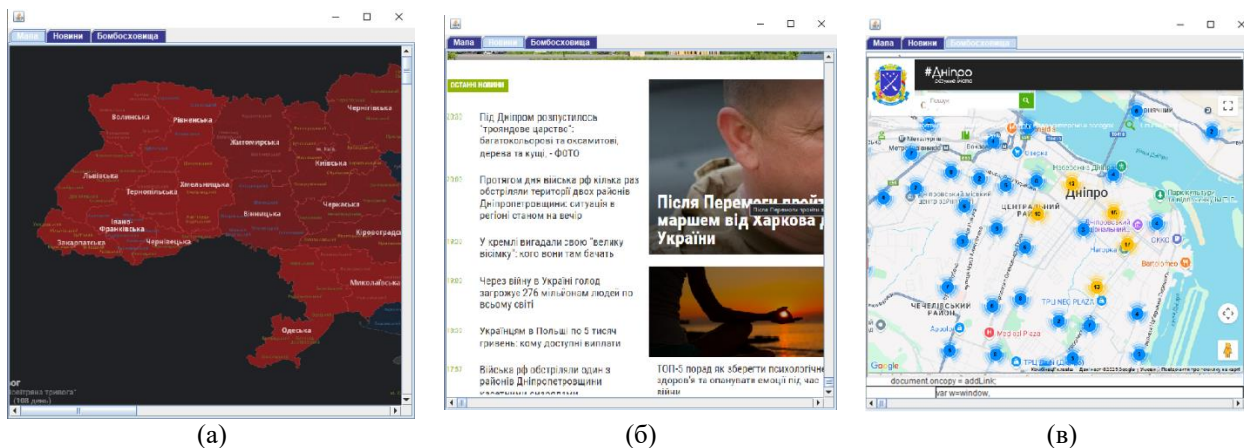


Рис. 5 – Реалізація десктопного інтерфейсу: мапа тривог (а); вікно з новинами (б); мапа бомбосховищ міста Дніпра (в)

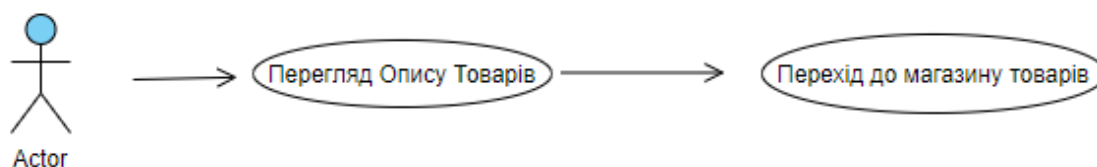


Рис. 6 – Діаграма взаємодії сценарію 2

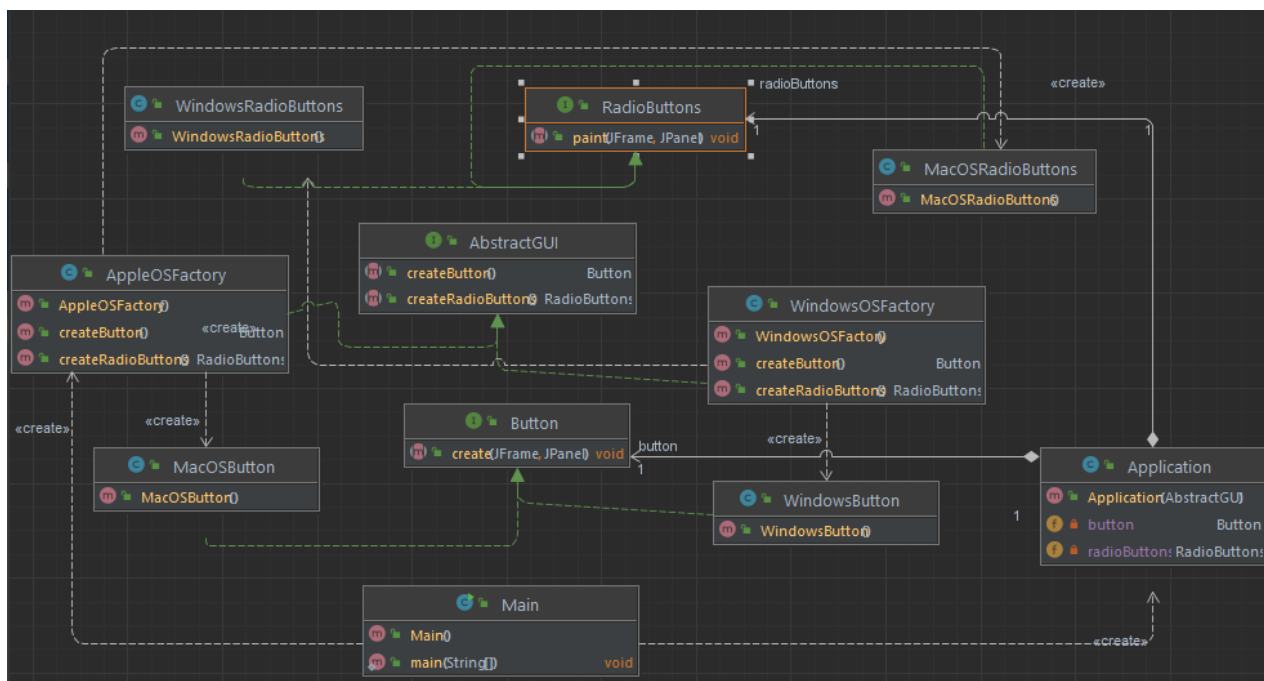


Рис. 7 – Ієрархія та взаємодія класів сценарію 2

Для розробки цього сценарію було обрано патерн «Абстрактна фабрика» (англ. Abstract factory), який дозволяє створювати пов'язані об'єкти, не залежачи від їх конкретної реалізації. Загальні характеристики продуктів виділяються в окремий інтерфейс, який описує спільні властивості, а відмінності переносяться у класи реалізацій. Сам інтерфейс виступає у ролі фабрики.

Такий підхід дає змогу створювати різноманітні за реалізацією продукти з подібними ознаками. Використання цього патерну полегшує розробку кросплатформних додатків, які формуються як конструктор із елементів інтерфейсу. Ієрархія класів даного сценарію наведена на рисунку 7.

Інтерфейс AbstractGUI виконує роль абстрактної фабрики та містить два абстрактні методи – `createButton()` і `createRadioButton()`, які дозволяють реалізувати різні фабрики під конкретні операційні системи або вимоги користувача. Фабрики `AppleOSFactory` та `WindowsOSFactory` відповідають за створення різних типів продуктів одного сімейства, використовуючи різні елементи як конструктор для формування цілісного інтерфейсу. Методи `createButton()` та `createRadioButton()` повертають продукти відповідно до конкретної реалізації, при цьому всі продукти належать до одного типу – `Button` або `RadioButton`. Абстрактні класи продуктів `Button` і `RadioButton` мають метод `paint()`, який конкретні класи `WindowsButton`, `MacOSButton`, `WindowsRadioButton` та `MacOSRadioButton` реалізують з урахуванням різного дизайну та функціональності. Вибір конкретної фабрики здійснює клієнтський код, який залежно від потреб викликає відповідну фабрику.

Для реалізації інтерфейсу був використаний наступний шаблон (рис. 8): рекламне оголошення має містити різні варіанти продуктів, рекламний текст і кнопку, що перенаправляє користувача на сайт із товаром.



Рис. 8 – Шаблон інтерфейсу

Для реалізації цього інтерфейсу використовуються класи: `JRadioButton` – для вибору продуктів та їх опису, `JTextArea` – для відображення рекламного

банера з інформацією, та `JButton` – для переходу на сайт продавця, де можна придбати товар.

Реалізація конкретних фабрик була проведена для операційних систем `Windows` і `MacOS`, ручне тестування підтвердило працездатність.

Третій сценарій взаємодії користувача з програмним продуктом – це редактор файлів на прикладі умовного текстового редактору. Сценарій взаємодії наведений на рис. 9.

Для розробки редактора файлів було застосовано патерн «Команда» (англ. `Command`), який дозволяє передавати запити як аргументи при виклику методів, що дає змогу ставити команди в чергу. Основна перевага такого підходу полягає в можливості виконувати відкат дій. Створену команду можна викликати з будь-якої частини коду. Текстовий редактор наочно демонструє це, коли одна й та сама операція може виконуватися у різний спосіб: наприклад, вставка тексту може здійснюватися як за допомогою кнопки «Вставка», так і через певну комбінацію клавіш – обидва способи виконують однаковий запит.

На рис. 10 наведена діаграма класів цього сценарію взаємодії. Клас `Command` визначає спільний інтерфейс для всіх конкретних команд і містить шаблон для реалізації відміни дій. Основним методом є `runCommand()`, який запускає відповідну операцію. Класи команд, такі як `Copy`, `Cut`, `Paste`, `Save` і `Open`, реалізують свою логіку саме через цей метод. Для команд, що змінюють вміст редактора (наприклад, `Cut` і `Paste`), необхідно зберігати стан редактора до виконання дії, щоб у разі відміни можна було відновити попередній стан. Історія виконаних команд зберігається у структурі `Stack`, що дозволяє додавати команди методом `push` і скасовувати останню дію через `undo`, витягуючи команду з кінця – це ідеально підходить для відміни змін у текстовому редакторі. Виклик команди здійснюється через обробник подій графічного інтерфейсу, де створюється об'єкт відповідної команди і викликається метод `runCommand()`. Такий підхід дозволяє легко реалізувати виконання команд для різних елементів чи комбінацій клавіш, не перевантажуючи основний код і спрощуючи його підтримку.

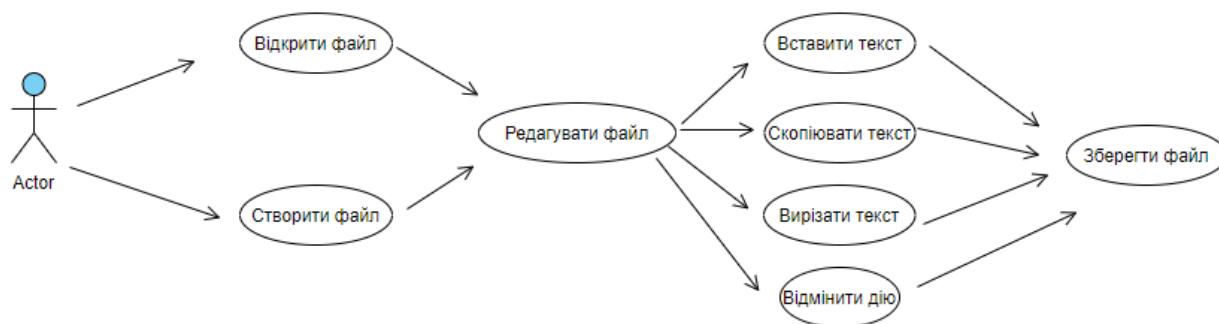


Рис. 9 – Діаграма взаємодії сценарію 3

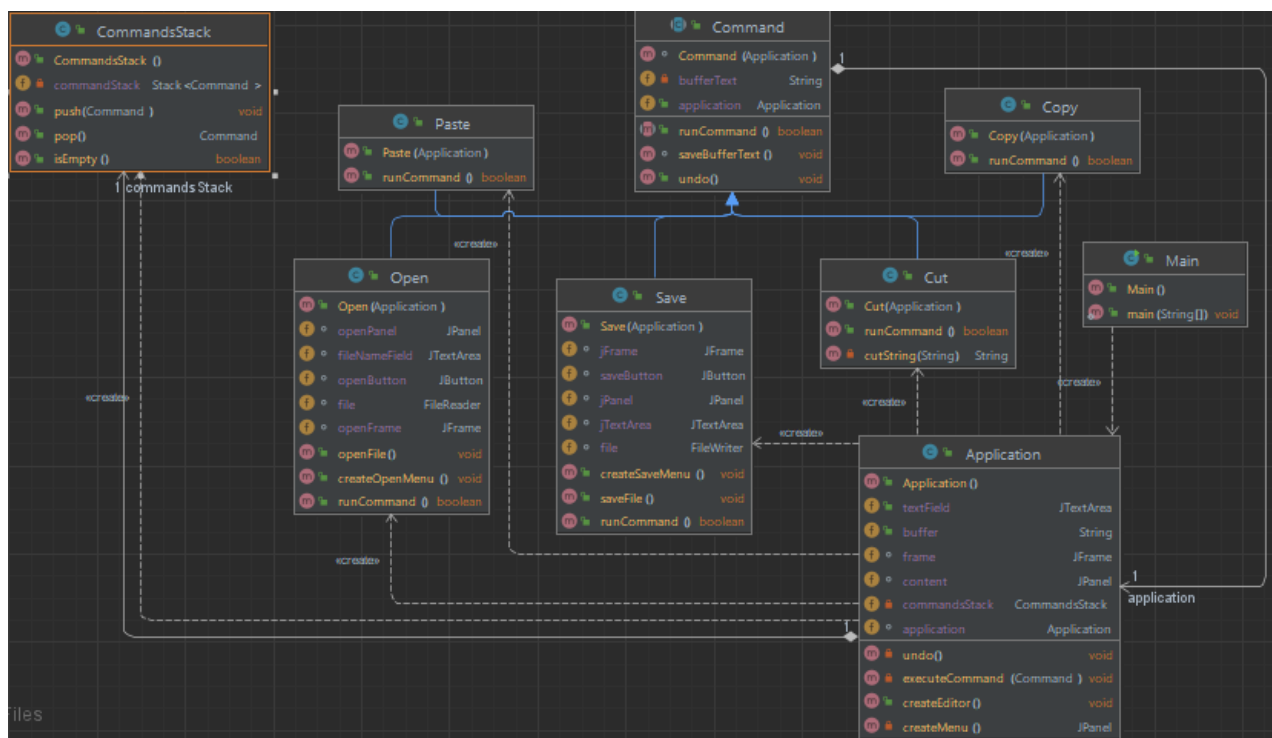


Рис. 10 – Ієрархія та взаємодія класів сценарію 3

Інтерфейс користувача (рис. 11) повинен містити меню з командами для редагування файлу, а також модальне вікно для відкриття та збереження файлів. На першій вкладці слід розмістити меню, яке відкриватиме вікна для вибору файлу або збереження, а також поле для редагування тексту. Друга вкладка має надавати користувачу можливість вставляти, копіювати, вирізати текст і скасовувати виконані дії. Меню відкриття файлу повинно містити поле для введення імені файлу та кнопку для відкриття, а меню збереження – аналогічне поле і кнопку для збереження.

Для реалізації такого інтерфейсу використовуються компоненти JTextArea для редагування тексту та введення імені файлу, JButton для виклику команд відкриття і збереження, а також JMenuBar для створення меню редагування файлів. Реалізований на Java інтерфейс є кросплатформним (рис. 12) і може використовуватися для подальшої розробки редакторів файлів, в тому числі і графічних.

Для даного сценарію також було проведено ручне тестування, яке підтвердило працездатність розробленого інтерфейсу.

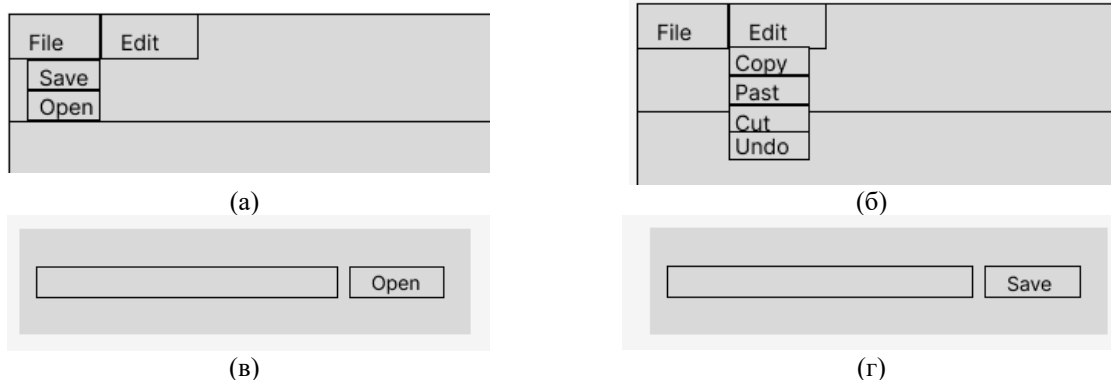


Рис. 11 – Шаблон інтерфейсу сценарію 3: пункт меню файл (а); меню редагування (б); меню відкриття файлу (в); меню збереження файлу (г)

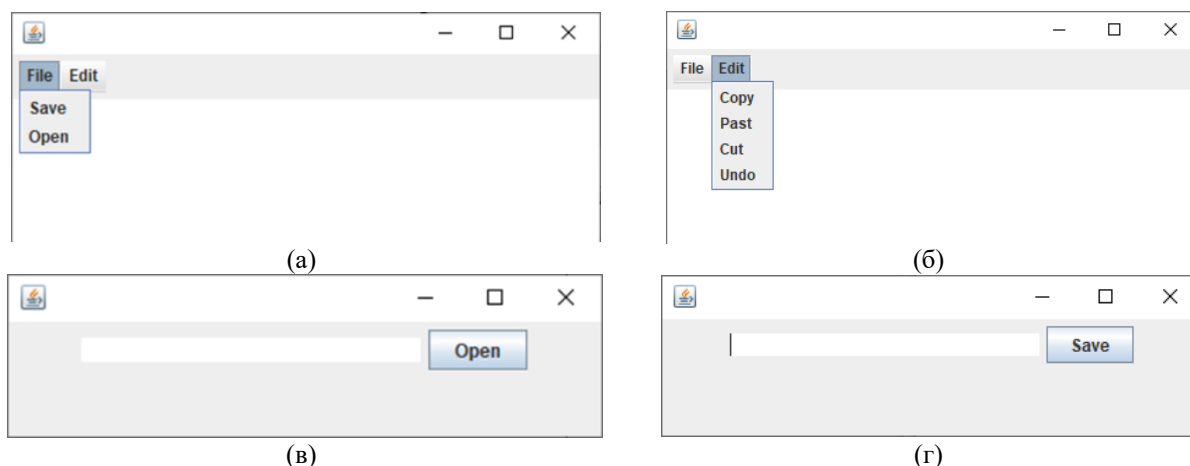


Рис. 12 – Реалізація інтерфейсу сценарію 3: пункт меню файл (а); меню редагування (б); меню відкриття файлу (в); меню збереження файлу (г)

Висновки

Патерни проєктування є чудовим рішенням для типових проблем, які виникають під час створення користувацьких інтерфейсів. Їх використання сприяє підвищенню ефективності розробки, забезпечує повторне використання коду та покращує взаємодію користувачів із системами. Найважливішою якістю будь-якого додатку є його здатність до масштабування та розширення функціоналу. Це дотримання принципу відкритості/закритості, що дозволяє додавати нові можливості без змін у початкових компонентах. Система поділяється на велику кількість простих модулів, які не ускладнюють загальну структуру, відповідаючи принципу KISS. Крім того, розробка інтерфейсів з використанням патернів дотримується одного з принципів SOLID – принципу Барбери Лісков, що гарантує коректну і ефективну заміну базових класів їхніми нащадками в основній логіці програми.

Перелік використаних джерел

- [1] Best Practices for UI Design Patterns. URL: <https://codener.com/best-practices-for-implementing-ui-design-patterns> (дата звернення: 12.01.2025).
- [2] UI Patterns. URL: <https://www.designrush.com/agency/ui-ux-design/trends/ui-patterns> (дата звернення: 12.01.2025).
- [3] Patterns in interface design. URL: <https://avada-media.ua/en/blog/patterny-v-proyektirovanii-interfeysov/#the-most-common-patterns> (дата звернення: 14.01.2025).
- [4] Design patterns. URL: <https://ui-patterns.com/patterns> (дата звернення: 12.01.2025).
- [5] Dannaway A. Practical UI. 2nd ed. 2025. 373 p.
- [6] Pelegrin J. Key UI and UX Patterns. URL: <https://duck.design/key-ui-and-ux-patterns> (дата звернення: 17.02.2025).
- [7] Video Game Interface Design Patterns to Facilitate Human-Agent Teaming / N.C. Sepich et al. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2023. Vol. 40. Pp. 7270-7285. DOI: <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2262824>.
- [8] Greenberg S., Godin T., Whittington J. User Interface Design Patterns for Wildlife-Related Camera Trap Image Analysis. Report 2019-1114-06, Department of Computer Science, University of Calgary, Calgary, AB., Canada. 26 p. DOI: <https://doi.org/10.11575/PRISM%2F36783>.
- [9] Cherukuri B.R. Development of Design Patterns with Adaptive User Interface for Cloud Native Microservice Architecture Using Deep Learning With IoT. 2024 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (IC2PCT), Greater Noida, India, 9-10 Feb. 2024. Vol. 5. Pp. 1866-1871. DOI: <https://doi.org/10.1109/IC2PCT60090.2024.10486720>.
- [10] Energy gamification: design and development of a user interface tool to upgrade social experience and energy literacy / J. Cravinho et al. *Open Research Europe*. 2023. Vol. 2. 2023. Pp. 1-32. DOI: <https://doi.org/10.12688/openreseurope.15158.2>.
- [11] User Interface Design Patterns for Infotainment Systems Based on Driver Distraction: A Colombian Case Study / J.P. Alarcon et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(13). Article 8186. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14138186>.
- [12] Du Y., Zhang X., Liu Z. User Interface Design for Digital Collections APP in the Metaverse Perspective. 2024 17th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), 14-15 Dec. 2024. Pp. 252-255. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCID63852.2024.00064>.

- [13] Mahmood K., Tariq F., Rasool G. Recovery of User Interface Web Design Patterns using Regular Expressions. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2018. Vol. 9, iss. 4. Pp. 405-420. DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.090457>.

DEVELOPMENT OF USER INTERFACE TEMPLATES BASED ON DESIGN PATTERNS

Sokolova N.	PhD (Engineering), associate professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2493-3553 , e-mail: n.olegowna@gmail.com ;
Khara G.	M.Sc., Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1165-901X , e-mail: kharaherman@gmail.com ;
Balalaieva O.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1461-4399 , e-mail: balalaeva_e_u@pstu.edu ;
Olevskiy V.	D.Sc. (Engineering), professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3824-1013 , e-mail: olevskiy.v.i@nmu.one

This article is devoted to the study of the issue of developing interface templates using design patterns. The relevance of the study is due to the constant growth of the number of software products in various fields, which requires the creation of efficient, flexible and scalable architectures. The development of user interface templates based on Design Patterns is a multifaceted topic that covers adaptability, specialized solutions, integration of modern technologies and reuse of existing solutions. The sources reviewed demonstrate how patterns can be adapted to different contexts, from gamification to image analysis and metaverse. This emphasizes their versatility and importance in modern UI design. A description of three interface templates for different user interaction with software products is given, in particular for a cross-platform application with emergency information, an advertising application and a file editor. For each of them, the choice of pattern, the hierarchy and interaction of classes and the features of the interface implementation are described. The study showed that the use of Creational Design Patterns Factory Method and Abstract Factory, as well as the Behavioral Pattern Command, allows to significantly increase the flexibility, scalability and maintainability of software products, and also helps to reduce development time and improve the quality of the final product. This work demonstrates the practical value of design patterns for the development of modern, effective and convenient user interfaces, and also confirms the feasibility of their use in real software projects. The practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained results by both active developers and students to create effective, functional and convenient interfaces, as well as for in-depth study of disciplines related to Design Patterns and software architecture.

Keywords: user interface, design patterns, class hierarchy, Java, software product, interface templates, cross-platform.

References

- [1] Best Practices for UI Design Patterns. [Online]. Available: <https://codener.com/best-practices-for-implementing-ui-design-patterns>. Accessed on: January 12, 2025.
- [2] UI Patterns. [Online]. Available: <https://www.designrush.com/agency/ui-ux-design/trends/ui-patterns>. Accessed on: January 12, 2025.
- [3] Patterns in interface design. [Online]. Available: <https://avada-media.ua/en/blog/patterny-v-proyektirovanii-interfeysov/#the-most-common-patterns>. Accessed on: January 14, 2025.
- [4] Design patterns. [Online]. Available: <https://ui-patterns.com/patterns>. Accessed on: January 12, 2025.
- [5] A. Dannaway, *Practical UI*, 2nd ed. 2025.
- [6] J. Pelegrin, *Key UI and UX Patterns*. [Online]. Available: <https://duck.design/key-ui-and-ux-patterns>. Accessed on: February 17, 2025.
- [7] N. Sepich, M. Talyat, E. Didic, M.C. Dorneich, and S.B. Gilbert, "Video Game Interface Design Patterns to Facilitate Human-Agent Teaming," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 40, pp. 7270-7285, 2023. doi: **10.1080/10447318.2023.2262824**.
- [8] S. Greenberg, T. Godin, and J. Whittington, "User Interface Design Patterns for Wildlife-Related Camera Trap Image Analysis," Department of Computer Science, University of Calgary, Calgary, AB., Canada, Report 2019-1114-06, 2019. doi: **10.11575/PRISM%2F36783**.
- [9] B.R. Cherukuri, "Development of Design Patterns with Adaptive User Interface for Cloud Native Microservice Architecture Using Deep Learning With IoT," in Proc. of the 2024 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (IC2PCT), Greater Noida, India, 2024, vol. 5, pp. 1866-1871. doi: **10.1109/IC2PCT60090.2024.10486720**.
- [10] J. Cravinho, R. Lucas, M. Brito, D.P. Albuquerque, U. Mithoowani, and N.M. Mateus, "Energy gamification: design and development of a user interface tool to upgrade social experience and energy literacy,"

Open Research Europe, vol. 2, pp. 1-32, 2023. doi: **10.12688/openreseurope.15158.2**.

- [11] J. Alarcón, I. Balcázar, C.A. Collazos, H. Luna, and F. Moreira, "User Interface Design Patterns for Infotainment Systems Based on Driver Distraction: A Colombian Case Study," *Sustainability*, vol. 14(13), article 8186, 2022. doi: **10.3390/su14138186**.

- [12] Y. Du, X. Zhang, and Z. Liu, "User Interface Design for Digital Collections APP in the Metaverse Perspective," in *Proc. of the 2024 17th International Symposium on Computational Intelligence and Design*

(ISCID), Dec. 14-15, 2024, pp. 252-255. doi: **10.1109/ISCID63852.2024.00064**.

- [13] K. Mahmood, F. Tariq, and G. Rasool, "Recovery of User Interface Web Design Patterns using Regular Expressions," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 9, iss. 4, pp. 405-420, 2018. doi: **10.14569/IJACSA.2018.090457**.

Стаття надійшла 04.07.2025

Стаття прийнята 28.07.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Розробка шаблонів користувацького інтерфейсу на основі патернів проектування / Соколова Н. О., Хара Г. Л., Балалаєва О. Ю., Олевський В. І. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 9-18. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344593>.

ОГЛЯД БАЗ ДАНИХ ПРИ РОЗРОБЦІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РІЗНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Воротнікова З.Є. канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0746-5981>, e-mail: vorotnikova_z_j@pstu.edu

Сучасний світ баз даних характеризується постійними змінами, спричиненими появою нових технологій та зростанням потреб бізнесу. Серед ключових тенденцій варто виділити: зростання популярності хмарних баз даних, які забезпечують масштабованість та економію; активне використання NoSQL баз даних, що відрізняються гнучкістю; інтеграцію штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації процесів; поширення розподілених баз даних для обробки великих обсягів даних; зростаючий попит на аналітику даних в реальному часі; розвиток технологій «розрахунків в оперативній пам'яті» In-Memory Databases (IMDB) та підвищену увагу до безпеки даних. Правильний вибір системи управління базами даних (СУБД) є ключовим для успішної роботи програмного забезпечення, оскільки він безпосередньо впливає на її продуктивність, масштабованість, безпеку та ефективність. Нехтування особливостями операційної системи може призвести до серйозних проблем у майбутньому. Різні ОС мають різні архітектурні особливості, що впливають на продуктивність баз даних. Деякі бази даних, наприклад, Microsoft SQL Server, оптимізовані для конкретних ОС. Це дослідження представляє огляд сучасних систем управління базами даних з метою обрання оптимальної системи управління базами даних для конкретної задачі. Дослідження включає аналіз останніх публікацій, які підтвердили, що обміркований вибір СУБД потребує аналізу за багатьма критеріями і не є тривіальною задачею. Огляд літератури також показав, що дослідження у цьому напрямку є актуальними, затребуваними та забезпечують зручність і доступність в виборі оптимального програмного забезпечення. Було вивчено особливості функціонування 11 найпопулярніших СУБД станом на 2024 рік, зроблено порівняльний аналіз та надано рекомендації по вдалих областях застосування. Запропонований огляд сприяє раціоналізації обрання прийнятної СУБД для потреб розв'язання сучасних завдань обробки даних.

Ключові слова: СУБД, SQL, NoSQL, IMDB, реляційна база даних, нереляційна база даних, операційна система, CAP-теорема.

Постановка проблеми

Реалії сучасного світу породжують найвищий рівень вимог до електронних платформ. Більшість додатків так чи інакше потребують зберігання даних, починаючи від інформації про користувачів та їх публікації, закінчуючи даними телеметрії, такими як файли журналів та статистика використання. Найбільш поширеним і зручним засобом для зберігання подібної інформації є база даних, до якої можна звертатися через систему управління базами даних (СУБД). СУБД – це програмне забезпечення, призначене для створення та управління базами даних. Воно забезпечує структуроване зберігання даних та надає механізми для їх обробки та вилучення. СУБД виступають у ролі посередника між користувачем і базою даних. Структура БД може відрізнятися залежно від реалізації, але, як правило, це або набір файлів, що зберігаються на жорсткому диску або твердотільних накопичувачах, на яких СУБД серіалізує інформацію, або набір структур даних, що зберігаються безпосередньо в оперативній пам'яті In-Memory Databases (IMDB) [1].

Розробка структури бази даних (БД) може здійснюватись двома основними способами: за допомогою вбудованих засобів самої системи управління базами даних (СУБД) або з використанням мови моделювання UML, що підтримується зовнішніми CASE-засобами.

Використання засобів СУБД: наприклад, при створенні реляційної бази даних MySQL, PostgreSQL

або Oracle можна використовувати вбудовані інструменти для проектування та генерації схеми.

Зазвичай передбачається створення таблиць, визначення ключів, зв'язків, обмежень та індексів безпосередньо в інтерфейсі чи через скрипти SQL.

Використання UML та CASE-засобів:

UML (Unified Modeling Language) надає графічні нотації для моделювання структур даних, що полегшує візуалізацію та аналіз архітектури бази.

CASE-засоби (Computer-Aided Software Engineering), такі як ERWin та Enterprise Architect, дозволяють створювати діаграми класів, ER-діаграми та інші моделі для проектування структури бази даних [2].

Ці інструменти допомагають визначити сутність, атрибути, зв'язки та обмеження, а також автоматично генерувати SQL-код для створення бази.

Приклад використання CASE-засобів:

У Enterprise Architect можна створити ER-діаграму, що моделює таблиці та зв'язки, а потім експортувати схему у вигляді SQL-скриптів для реалізації у вибраній СУБД.

Такий підхід сприяє більш чіткому плануванню та документуванню структури бази даних, а також полегшує її підтримку та розширення.

В цілому, вибір методу залежить від вимог проекту, складності бази даних та переваг розробника. Використання UML і CASE-засобів найчастіше на етапах

проектування, оскільки забезпечує наочність і зручність моделювання.

Зараз існує більше 300 всіляких СУБД. Одними з найбільш високопродуктивних, популярних і активно підтримуваних СУБД є Oracle Database, MySQL, Microsoft SQL Server, PostgreSQL, Redis [3] (відповідно до рейтингу DB-Engines Ranking). Серед всього різноманіття СУБД можна виділити деякі відмінності кожної з таких параметрах, як тип реалізованої БД, специфіка (область) застосування, тип доступу до коду (ліцензія, open-source) та ін.

САР-теорема, запропонована Еріком Брюером на початку 2000-х років, є основним принципом у галузі розподілених систем. Вона стверджує, що розподілена база даних не може одночасно забезпечувати всі три властивості [4]:

Узгодженість (Consistency) – всі вузли системи бачать однаковий стан даних у будь-який момент часу.

Доступність (Availability) – кожен запит отримує відповідь незалежно стану системи, навіть при збоях.

Стійкість до поділу (Partition Tolerance) – система продовжує працювати нормально навіть при поділі мережі або у відмові частини вузлів.

Основний висновок САР-теорема полягає в тому, що за наявності мережових поділів (розділених мереж) розробникам доводиться робити вибір між забезпеченням узгодженості та доступності. Деякі системи наголошують на узгодженості (наприклад, традиційні реляційні бази даних). Інші – доступності і стійкості до поділів (наприклад, системи NoSQL, такі як Cassandra або Riak). Треті намагаються знаходити баланс, надаючи налаштування для компромісу між цими характеристиками.

Таким чином, проєктувальники та розробники повинні враховувати особливості своїх додатків та вибирати відповідну систему, усвідомлюючи обмеження САР-теорема.

Вибір системи управління базами даних є складним багатопараметричним завданням та одним із ключових етапів розробки додатків баз даних. Правильний вибір програмного продукту має враховувати як поточні, так і майбутні потреби організації, забезпечуючи масштабованість і гнучкість системи. При цьому необхідно враховувати фінансові витрати на придбання обладнання, системи та програмного забезпечення, а також витрати на навчання персоналу та впровадження.

Важливо провести комплексний аналіз, щоб визначити, яка СУБД найбільше відповідає специфіці бізнесу, обсягу даних, навантажень та вимог до безпеки. Також необхідно оцінити можливість інтеграції з існуючими системами та наявність підтримки з боку постачальника.

Вибрана система має не тільки відповідати технічним вимогам, але й забезпечувати реальні вигоди підприємству, такі як підвищення ефективності роботи, зниження витрат та покращення якості обслуговування клієнтів. Таким чином, ретельний аналіз та виважений підхід до вибору СУБД дозволяють забезпечити

успішну реалізацію проєкту та довготривалу його ефективність. В умовах середовища, що постійно розривається, завдання вибору оптимальної СУБД як ніколи актуальне.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Існує значна кількість досліджень, що присвячені аналізу тенденцій у розвитку систем управління базами даних. Ці дослідження базуються на різноманітних класифікаціях, які дозволяють краще зрозуміти особливості та напрямки еволюції сучасних систем. У роботах [5, 6] представлено детальну класифікацію СУБД за кількома важливими ознаками. Зокрема, вони поділяють системи за ступенем універсальності: до загального призначення належать системи, здатні працювати з різноманітними типами даних і застосовуватися у різних галузях, тоді як спеціалізовані системи орієнтовані на конкретні завдання або сфери діяльності. Крім того, у класифікації враховується рівень продуктивності систем, що визначає їх ефективність у обробці великих обсягів даних та швидкодії. Ще одним важливим параметром є спосіб доступу до даних: системи можуть бути класифіковані за моделлю доступу – наприклад, реляційні, ієрархічні, мережові або об'єктно-орієнтовані. Окрім цього, у дослідженнях [7, 8] розглядаються сучасні методи захисту даних у СУБД, що є критично важливим у контексті зростаючого обсягу інформації та підвищення вимог до її безпеки. Підсумовуючи, ці дослідження сприяють глибшому розумінню сучасних тенденцій розвитку систем управління базами даних і дозволяють визначити перспективні напрямки їх удосконалення та застосування у різних сферах.

У книгах [9, 10] розглядаються різні підходи та критерії, які можна застосовувати при виборі систем управління базами даних (СУБД). Наводяться вимоги до програмного забезпечення, що дозволяє більш ефективно та обґрунтовано підходити до процесу прийняття рішення. Зазвичай, найпростіший і найшвидший спосіб – це оцінка відповідності існуючих систем основним вимогам конкретного проєкту інформаційної системи. Такий підхід дозволяє швидко визначити найбільш підходящу СУБД без необхідності складних тестувань або додаткових витрат.

Проте існує й більш складний і дорогий спосіб – це створення прототипу або випробувального проєкту, що базується на кількох різних системах управління базами даних. Після проведення порівняльних тестів і аналізу результатів робиться вибір найбільш відповідної системи. Хоча цей метод і вимагає більших зусиль та ресурсів, він дозволяє отримати більш об'єктивну оцінку та врахувати специфічні особливості кожної системи перед остаточним вибором. Водночас, навіть при такому підході важливо обмежити коло кандидатів, спираючись на визначені критерії відбору, що допомагає зменшити кількість варіантів та зосередитися на найбільш перспективних.

Критерії для вибору СУБД можна класифікувати на кілька груп:

- Моделювання даних – враховує архітектурні особливості системи та її функціональні можливості, зокрема підтримку різних типів даних і способів їх обробки [11, 12, 14].

- Контроль роботи системи – оцінка механізмів управління транзакціями, забезпечення цілісності та безпеки даних [11, 15].

- Особливості розробки програм – враховують зручність та ефективність процесу створення та підтримки додатків, що працюють з обраною СУБД [12].

- Продуктивність – швидкість обробки запитів, здатність працювати з великими обсягами даних і підтримувати високий рівень навантаження [12, 13, 15].

- Надійність – здатність системи стабільно функціонувати у різних умовах, механізми резервного копіювання та відновлення [11, 15].

- Вимоги до робочого середовища – сумісність із апаратним забезпеченням і операційною системою, а також з іншими використовуваними технологіями [14, 15].

Загалом, список вимог до СУБД, які використовуються під час аналізу та вибору, може значно варіюватися залежно від конкретних цілей проєкту, масштабів системи та специфіки задач, що вирішуються. Важливо враховувати всі ці фактори для прийняття обґрунтованого і оптимального рішення щодо вибору системи управління базами даних.

Проблемам узгодженості (consistency), доступності (availability) та стійкості до розділення (partition tolerance) присвячені роботи [16-18]. У статтях [16, 18] аналізується перехід від монолітних сховищ даних до архітектур на основі мікросервісів, відображається еволюція прийняття архітектурних рішень у розподілену епоху під призмою CAP-теорема. Робота [17] присвячена дослідженню компромісів, на які компанії повинні піти при поліпшенні узгодженості, доступності та стійкості до розділів за правилом Брюера. Стаття [19] присвячена пошукам компромісу між узгодженістю та доступністю при проектуванні інформаційних систем. Особливостям реалізації рішень для Хмарних технологій присвячені роботи [19, 20]. У статті [20] розглядається критично важливий аспект узгодженості даних у глобально розподілених базах даних, зокрема, Azure Cosmos DB фірми Microsoft.

Порівнянням характеристик та можливостей різних СУБД присвячені роботи [21-23]. У статті [21] порівнюється агрегатні функції та функції Windows у трьох основних системах управління реляційними базами даних: Oracle, SQL Server та MySQL. Ці функції необхідні для обробки великого набору даних і підготовки його до ефективного аналізу. Крім того, у цій статті розглядається інтеграція можливостей машинного навчання та підключення до баз даних NoSQL у рамках цих платформ. Це дослідження покликане допомогти адміністраторам і розробникам баз даних

вибрати найбільш відповідну СУБД відповідно до їх конкретних потреб у агрегації, машинному навчанні, інтеграції NoSQL. У роботі [22] порівнюються системи на основі пошуку, SQL та NoSQL. Метою даного дослідження є надання характеристик, класифікації та оцінки системи управління базами даних, яка називається NoSQL, в аналітиці великих даних. Численні дослідження, які порівнюють можливості баз даних SQL і NoSQL, зокрема Oracle RDBMS і NoSQL Document Database (MongoDB), з погляду масштабу, продуктивності, доступності, узгодженості та шардингу представлені в огляді [23].

Таким чином, наукова проблематика, пов'язана з вивченням та порівнянням можливостей та характеристик різних СУБД, є надзвичайно актуальною. Вона обумовлена потребою в консолідованій інформації про індустрію СУБД та досвід їх використання, що відповідає вимогам сучасного цифрового суспільства. Вирішення цієї проблеми дозволить підвищити інформованість та грамотність користувачів, оптимізувати їх витрати та забезпечити більш ефективну діяльність.

Мета статті

Метою роботи є висвітлення та порівняння основних характеристик сучасних популярних систем управління базами даних (СУБД) з метою вибору більш прийнятної СУБД для потреб розв'язання певних задач.

Виклад основного матеріалу

Зазвичай вибір бази даних зумовлений тим, що використовували раніше або застосували вже у суміжних проєктах. Але іноді для нового проєкту є можливість вибрати щось нове. І правильний вибір бази даних стає одним із найважливіших рішень. Від цього залежить насамперед кількість зусиль, які потрібно докласти для вирішення того чи іншого завдання, терміни та бюджет проєкту, вартість фахівців, які володіють навичками роботи з тією чи іншою СУБД. Від бази даних великою мірою залежить продуктивність всього рішення та її надійність.

Незважаючи на те, що всі СУБД виконують спільну та важливу функцію забезпечення користувачам можливості створювати, редагувати та отримувати доступ до збереженої інформації, способи та методи роботи з даними, а також рівень автоматизації та зручності використання, можуть значно варіюватися між різними платформами. Крім того, функціональні можливості та набір інструментів, які пропонує кожна конкретна СУБД, часто різняться – одні системи мають більш розвинуті механізми безпеки, масштабування чи обробки даних, тоді як інші орієнтовані на більш вузький спектр завдань.

Що стосується документації та технічної підтримки, то вони також можуть бути представлені різним ступенем систематичності. Вартість підтримки та

обслуговування може значно коливатися залежно від виробника та рівня сервісу, що пропонується.

При виборі оптимальної бази даних для конкретної організації важливо враховувати не лише її технічні характеристики, але й зручність у користуванні, можливість масштабування під зростаючі потреби бізнесу, а також ступінь інтеграції з іншими використовуваними системами та програмними продуктами. Важливо переконатися, що обрана СУБД легко піддається інтеграції з вже існуючою інфраструктурою та може працювати в межах заданих технічних та бізнесових вимог.

Крім того, слід враховувати наскільки легко може адаптуватися та змінюватися ця система у міру зростання та змін організації. Врахування всіх цих аспектів дозволить обрати найбільш відповідний продукт, який не лише задовольнить поточні потреби, але й забезпечить гнучкість та довгострокову стабільність у майбутньому.

Однією з вимог до робочого середовища є перелік операційних систем, що підтримують роботу СУБД. Розробники систем управління базами даних стикаються з проблемою операційного середовища. Із цього приводу є крайні точки зору. Одні вважають, що СУБД повністю має залежати від операційної системи, інші, що ОС має надати необхідні і достатні засоби. Практично неможливо виготовити справді ефективну систему управління баз даних, не розширюючи можливості операційної системи.

Якби потрібно було розробити сервер баз даних, що працює один на виділеному комп'ютері, то найкращим рішенням було б створювати його в розрахунок на машину взагалі без операційної системи. Фактично, це означало б створення деякого гібрида ОС і СУБД [24], у якому не було б нічого зайвого, а необхідні кошти було б реалізовано оптимально. Але звичайною вимогою до серверів баз даних є те, що повинна існувати можливість їх запуску в суміші з іншими програмами користувача, які, природньо, не можуть виконуватися без підтримки операційної системи. Сучасні ОС дозволяють деяким програмам користувача обійти обмеження операційної системи, що заважають їм, що обумовило появу таких технологій як in-memory, механізм ODBC (Open Database Connectivity) [25] та ін. Але все ж нехтування особливостями операційної системи може призвести до серйозних проблем у майбутньому. Різні ОС мають різні архітектурні рішення, що впливають на продуктивність баз даних. Деякі бази даних, наприклад, Microsoft SQL Server, взагалі оптимізовані для конкретних ОС.

Суттєвим моментом є вибір базової технології роботи з БД: класична реляційна SQL-база або NoSQL? У обох категорій є свої переваги та недоліки.

Реляційні бази даних (РБД) являють собою один з найпопулярніших і широко використовуваних типів систем для зберігання і обробки даних [26]. Вони організовують інформацію у вигляді таблиць, кожна з яких має чітку і строго визначену структуру. Така

організація дозволяє легко працювати з даними, підтримувати їхню цілісність і забезпечувати швидкий доступ до необхідної інформації. Основною мовою для взаємодії з реляційними базами є SQL (Structured Query Language), яка використовується для формулювання запитів, управління даними, їхнього оновлення та контролю цілісності даних. У цих системах дані зберігаються у вигляді рядків (записів) і стовпців (атрибутів), що сприяє високому рівню структурованості та зручності у роботі з ними. Це дозволяє чітко визначати залежності між різними елементами даних і забезпечує ефективне їхнє використання.

Щодо масштабування таких систем, то найчастіше воно виконується вертикально, тобто за рахунок збільшення ресурсів одного сервера. Це може включати додавання процесорів, розширення оперативної пам'яті, збільшення обсягу дискового простору тощо. Такий підхід має свої недоліки, оскільки в процесі оновлень або міграцій сервер може припинити роботу, що призводить до простоїв. Хоча горизонтальне масштабування (розподіл даних між кількома серверами) є можливим і дозволяє підвищити масштабованість системи, але воно вважається більш складним у реалізації і вимагає значних змін у структурі бази даних та додаткових зусиль для синхронізації та управління.

Реляційні системи демонструють високу продуктивність при обробці транзакцій з невеликими та середніми обсягами даних, особливо якщо використовуються індекси для прискорення пошуку і виконання з'єднань між таблицями. Проте з ростом обсягів даних або кількості одночасних запитів може спостерігатися зниження швидкості роботи системи, що вимагає додаткових оптимізацій.

Важливим аспектом роботи РБД є дотримання принципів ACID (Атомарність, Узгодженість, Ізоляція, Довговічність). Ці принципи забезпечують цілісність і надійність транзакцій, тому системи автоматично підтримують ці вимоги без необхідності додаткових зусиль з боку користувача або адміністратора. Це особливо важливо у сферах, де критично важливо зберігати точність і цілісність даних, наприклад, у фінансових додатках, системах бухгалтерського обліку або електронній комерції.

З іншого боку, нереляційні бази даних, або системи NoSQL [27], використовують альтернативні моделі зберігання даних: ключ-значення, документи у форматі JSON, граfi та інші. Вони дозволяють зберігати неструктуровані або напівструктуровані дані, такі як тексти, зображення, мультимедійні файли. Запити в таких системах зазвичай є більш гнучкими і дозволяють працювати з даними у форматах, що не підходять для традиційних таблиць.

При зростанні обсягів даних і кількості запитів нереляційні системи зазвичай масштабуються горизонтально, шляхом додавання нових серверів у розподілену мережу. Це дозволяє зменшити навантаження на окремі вузли, підвищити доступність і забезпечити високу продуктивність роботи з великими обсягами

даних і численними користувачами. Однак системи NoSQL мають нижчий рівень безпеки і гарантій цілісності даних, що може бути недоліком у деяких сценаріях, де важлива абсолютна надійність.

Завдяки здатності зберігати різноманітні типи даних і легко масштабуватися у розподілених середовищах, популярність баз даних NoSQL швидко зростає. Вони особливо актуальні для швидкої розробки мінімально життєздатних продуктів (MVP) у стартапах і проєктах, що вимагають гнучкого підходу до структуривання даних. Такі системи не потребують тривалого попереднього налаштування і дозволяють швидко вносити зміни у структуру даних без значних простоїв, що є важливою перевагою у сучасних умовах розвитку технологій.

Сучасні програмні системи все частіше використовують комбінацію реляційних та нереляційних баз даних (NewSQL), щоб отримати максимальну вигоду від їхніх сильних сторін [28]. Реляційні бази даних (SQL) чудово справляються зі складними запитамі та транзакціями, тоді як нереляційні (NoSQL) забезпечують високу швидкість обробки великих обсягів даних. Реляційні бази даних особливо цінні для критично важливих даних, таких як фінансові операції, де цілісність інформації є першочерговою. Вони зараз активно розвиваються у напрямку долучення модулів, що підтримують функції NoSQL.

На рис. дано фрагмент діаграми популярності різних видів СУБД станом на 2024 р. [29]. Розглянемо найпопулярніші СУБД, проаналізуємо їх архітектурні

принципи, оптимальні варіанти використання, а також плюси та мінуси кожної технології (табл. 1).

PostgreSQL є однією з провідних систем управління реляційними базами даних, яка займає почесне перше місце у світі серед інших популярних систем. Її популярність обумовлена високою гнучкістю, розширюваністю та відповідністю сучасним стандартам обробки даних [30].

PostgreSQL є об'єктно-реляційною системою управління базами даних, вона підтримує об'єктно-орієнтований підхід у межах реляційної моделі. Це дозволяє користувачам поєднувати табличні структури з об'єктно-орієнтованими концепціями для створення складних ієрархічних структур даних. Крім того, PostgreSQL спрямовано на зміцнення відповідності стандартам SQL та розширюваності системи, що забезпечує високий рівень сумісності та можливість адаптації під специфічні задачі.

Ця СУБД є кросплатформною, що сприяє широкому впровадженню у багатьох сферах та умовах експлуатації.

Завдяки широкому спектру функцій та можливостей автоматизації, PostgreSQL є ідеальним рішенням для аналізу і зберігання великих обсягів даних. Вона підходить для створення інструментів автоматизації баз даних, що потребують високої продуктивності, відповідності стандартам ACID та потужного SQL-движка. Це робить її популярною серед фінансових установ, телекомунікаційних компаній та організацій, що мають високі вимоги до обробки та збереження даних.

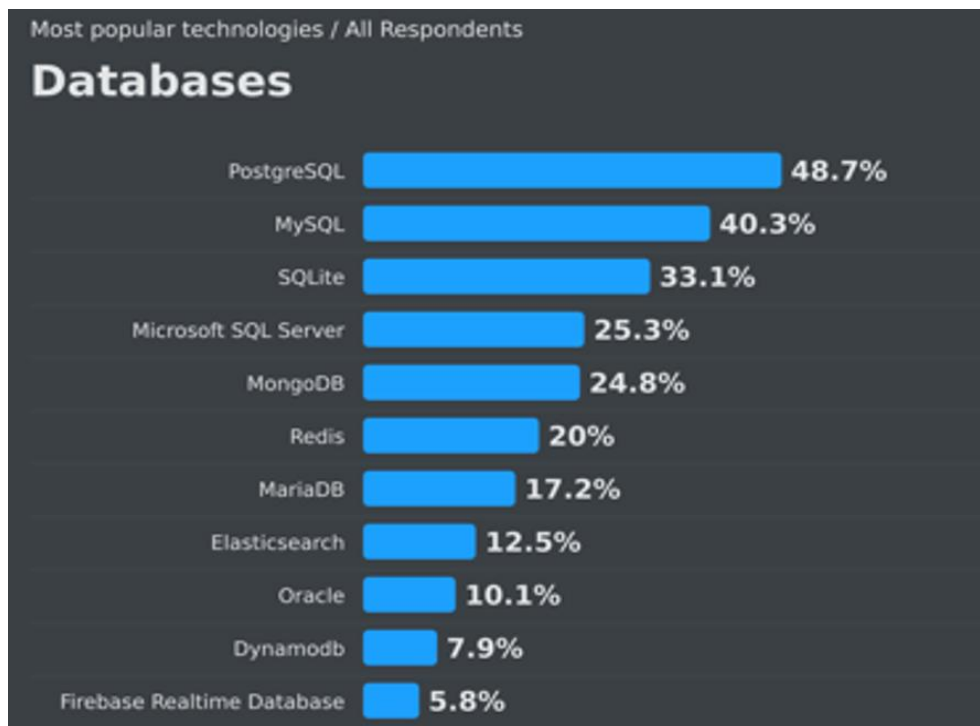


Рис. – Найпопулярніші СУБД у 2024 році (фрагмент діаграми)

Таблиця 1

Порівняння переваг та недоліків популярних СУБД

Система	Переваги	Недоліки
PostgreSQL	Надійність, масштабованість, підтримка JSON/XML/PostGIS, розширюваність, широкий спектр типів даних, багата екосистема, транзакції ACID, комерційні версії	Неповна документація, обмежені інструменти звітності та аудиту
MySQL	Безкоштовна простота, хороша інтеграція з PHP, підтримка хмар	Обмежена масштабованість, несумісність зі стандартами SQL, ліцензія Oracle
SQLite	Швидке читання, переносимість, легке встановлення, надійність, відсутність серверної архітектури	Обмежена підтримка типів та багатопотоковості, відсутність серверної архітектури, не підтримує Unicode за замовчуванням
SQL Server	Простота управління, інтеграція з Microsoft, хороша документація, хмарні рішення	Висока ціна, тільки під Windows, складності при великих обсягах, потрібний кваліфікований персонал
MongoDB	Швидкодія, горизонтальне масштабування, гнучка інтеграція, зберігання в оперативній пам'яті	Високе споживання пам'яті, слабка реляційна підтримка, ризик витоків пам'яті, складність відновлення
Redis	Висока продуктивність, низька затримка, масштабованість, вбудований кеш	Залежність від оперативної пам'яті, обмежена функціональність запитів, підтримка транзакцій обмежена
MariaDB	Висока безпека, шифрування, нові функції (GIS, динамічні стовпці, користувачські плагіни, механізми зберігання NoSQL, масштабованість), покращена продуктивність	Можливі проблеми зі стабільністю, молода спільнота, складнощі сумісності з MySQL
Elasticsearch	Надійна розподілена архітектура, хороша масштабованість, швидка обробка складних запитів	Підтримка лише JSON, обмежені інструменти моніторингу
Oracle 12c	Інноваційні технології, хмарна підтримка, обробка великих даних, висока надійність	Висока вартість, вимоги до потужної інфраструктури, складне освоєння для нових користувачів AWS
DynamoDB	Безсерверна, масштабована, проста налаштування, висока доступність	Обмежені можливості запитів, прив'язка до AWS, складнощі з аналітикою
Firebase	Простота для швидкого старту, легкий доступ і управління, хороша документація	Обмежені можливості складних запитів, складнощі при перенесенні даних

MySQL є однією з найпопулярніших СУБД у світі, яка з моменту свого створення пройшла значний шлях розвитку. Початково вона була випущена як рішення з відкритим вихідним кодом, що сприяло швидкому поширенню та широкому використанню у сфері веб-розробки. На теперішній час MySQL належить корпорації Oracle, що визначає її подальший розвиток та комерційну політику [31].

На сьогодні MySQL є основою класичних серверних веб-оточень та широко застосовується в популярних стекових рішеннях, таких як LAMP (Linux, Apache/nginx, MySQL, Perl/PHP/Python) та LEMP (Linux, nginx, MySQL, PHP/Python). Написаний мовами C і C++, MySQL відмінно підтримує роботу на різноманітних платформах: Linux, Windows, macOS, IRIX та інших, що забезпечує гнучкість і широкі можливості застосування.

MySQL є оптимальним рішенням для створення невисоко-навантажених веб-застосунків з обмеженим обсягом даних. Приклади таких застосувань включають локальні магазини електронної комерції, корпоративні сайти готелів або невеликі інтернет-портали. Оскільки системи OLAP (Online Analytical Processing) і OLTP (Online Transaction Processing) не вимагають складних запитів або обробки великих обсягів даних, MySQL є ідеальним інструментом у таких умовах. Крім того, варто розглянути використання MySQL у розробці інструментів бізнес-аналітики, де необхідна швидка обробка та аналіз даних.

SQLite – це швидка і легка однофайлова вбудована СУБД на мові C, яка не має сервера і дозволяє зберігати всю базу локально на одному пристрої. Для роботи SQLite не потрібні сторонні бібліотеки або служби. Поняття «вбудованій» означає, що СУБД не використовує парадигму клієнт-сервер. Двигун SQLite –

це не окремий процес, з яким взаємодіє програма, а бібліотека. Програма компонується з нею, і двигун служить складовою програми. Як протокол обміну використовуються виклики функцій (API) бібліотеки SQLite. Як і будь-яка СУБД, SQLite дозволяє записувати нову та запитувати існуючу інформацію, змінювати її, налаштовувати доступ. СУБД вбудовується у додаток та працює як його складова частина. Формат бази складається з одного текстового файлу, який можна прочитати на будь-якій платформі. Такий підхід підвищує продуктивність та швидкість роботи [32].

Працювати з SQLite можна як із бібліотекою, так і через SQLite3. SQLite3 – це консольна утиліта для роботи з SQLite від розробників СУБД. Вона запускається і працює у командному рядку, у консолі операційної системи. Ви можете завантажити версії для Windows, Mac OS та Linux.

За функціональністю SQLite3 є програмою-клієнт для клієнт-серверних додатків. З її допомогою можна вводити та передавати запити до бази даних: створювати, модифікувати, отримувати чи видаляти таблицю. Різниця в тому, що вона звертається не до окремого процесу-сервера, а до вбудованого в додаток движка SQLite.

Завдяки своїм властивостям SQLite застосовується на сайтах із низьким та середнім трафіком; у локальних однокористувацьких, мобільних додатках чи іграх, не призначених для масштабування; у програмах, які часто виконують прямі операції читання/запису на диск; у програмах для тестування бізнес-логіки. SQLite не вимагає адміністрування та працює на мобільних пристроях, ігрових приставках, телевізорах, безпілотних літальних апаратах, камерах, автомобільних мультимедійних системах тощо. СУБД використовує безліч програм: Firefox, Chrome, Safari, Skype, XnView, AIMP, Dropbox, Viber та інші.

Майкрософт SQL Server (MS SQL Server) являє собою високоєфективний комерційний інструмент для управління реляційними базами даних, що посідає одне з провідних місць серед сучасних СУБД. Ця система забезпечує надійне зберігання, обробку та зміну структурованих даних, що дозволяє ефективно реалізовувати різноманітні бізнес-застосунки та інформаційні системи [33].

MS SQL Server використовує мову Transact-SQL (T-SQL), яка є розширенням стандартного SQL і забезпечує широкі можливості для програмування, управління та обробки даних. Це дозволяє розробникам і адміністраторам створювати складні запити, процедурні скрипти та автоматизовані рішення для роботи з даними.

MS SQL Server є високорівневим рішенням, яке ідеально підходить для компаній із наявною підпискою на продукти Microsoft та інфраструктурою, орієнтованою на екосистему Microsoft. Його потужні функції, глибока інтеграція з хмарними сервісами та широкі можливості для бізнес-аналітики роблять його одним із найпопулярніших і найзатребуваніших інструментів

у корпоративному сегменті. Однак важливо враховувати високі витрати, складність налаштування та обмеження щодо операційної платформи при виборі цієї системи управління базами даних.

MongoDB – це сучасна нереляційна СУБД, що є безкоштовною та відкритою для модифікацій платформою, з комерційною версією для корпоративних клієнтів. Вона орієнтована на зберігання та обробку даних у форматі JSON-подібних документів, що забезпечує гнучкість у роботі як із структурованими, так і з неструктурованими даними. Такий підхід дозволяє застосовувати MongoDB до широкого спектру додатків, включаючи системи, що працюють із різнорідними даними [34].

Зв'язок між клієнтськими програмами та базою даних здійснюється через спеціальні драйвери, що забезпечують зручний інтерфейс для виконання операцій читання, запису, оновлення та видалення даних. Внутрішній кеш системи дозволяє одночасну обробку кількох типів даних, що підсилює швидкодію та ефективність роботи.

Завдяки високій швидкості та масштабованості, MongoDB ідеально підходить для систем, що потребують обробки даних у реальному часі. До прикладу, вона широко використовується для створення каталогів продуктів, де необхідно зберігати велику кількість об'єктів з різноманітними атрибутами. Крім того, MongoDB є актуальним рішенням для аналітичних платформ, оскільки її швидкодія дозволяє у режимі реального часу відстежувати поведінку користувачів та аналізувати великі обсяги даних.

Redis – це СУБД з відкритим вихідним кодом, що належить до класу NoSQL. Вона широко використовується як кеш-пам'ять, що забезпечує надзвичайно швидкий доступ до даних, що є критично важливим у сучасних високонавантажених системах [35]. Redis організовує дані у форматі пар «ключ-значення» і підтримує кілька структурованих типів даних, зокрема списки, множини та хеш-таблиці. Однією з ключових особливостей є можливість виконання реплікації даних та підтримки транзакцій, що дозволяє забезпечити високу доступність та цілісність інформації. Внутрішньою особливістю є обробка команд у черзі, що забезпечує ефективність та швидкість виконання операцій.

Основною сферою застосування Redis є сценарії, що вимагають високошвидкісного доступу до даних. Це включає, зокрема:

- Кешування даних. Зменшення навантаження на основні бази даних шляхом збереження часто запитуваної інформації у Redis, що суттєво підвищує швидкодію систем.

- Обробка даних для Інтернету речей (IoT). Великі обсяги даних, отримані з пристроїв IoT, можуть бути попередньо оброблені у Redis перед збереженням у довгостроковому сховищі.

- Мікросервісна архітектура. У системах з масштабованою хостинг-інфраструктурою Redis може

використовуватися як швидкий буфер або обробник даних, що не потребують довготривалого збереження.

MariaDB є відкритим та безкоштовним відгалуженням системи управління базами даних MySQL, яке підтримується на комерційній основі. Історично розроблялася як повністю сумісна з MySQL система, що дозволяє легко інтегрувати її у вже існуючі інформаційні системи без необхідності значних модифікацій. Основною особливістю MariaDB є відкритий вихідний код, що поширюється відповідно до ліцензії GNU General Public License (GPL), а також збереження сумісності з командами, API й бібліотеками, характерними для MySQL [36].

Оскільки MariaDB є системою, що тісно пов'язана з MySQL, її сфера застосувань здебільшого збігається з такою у MySQL. Водночас, очікується, що через покращену продуктивність та масштабованість MariaDB зможе стати більш ефективним рішенням для великих та високонавантажених систем. Це робить її перспективною платформою для сучасних корпоративних застосувань, що вимагають високої швидкодії, безпеки та гнучкості.

Elasticsearch – це архітектура NoSQL, яка орієнтована на документи СУБД, в основі якої лежить повнотекстова пошукова система. Побудований на базі бібліотеки Apache Lucene, вона зберігає дані у вигляді файлу JSON, підтримує API RESTful та використовує потужний аналітичний механізм для швидшого вилучення даних. Будучи програмним забезпеченням з відкритим вихідним кодом, вона включає як безкоштовні, так і платні версії [37].

У разі необхідності здійснення повнотекстового пошуку з БД (наприклад, пошук продукції на ресурсі для електронної комерції), Elasticsearch буде хорошим рішенням. Вона здатна швидко здійснювати пошук за величезним масивом даних і має велику функціональність (наприклад, вміє здійснювати пошук за іменованими категоріями).

Oracle Database 12c є СУБД, розробленою та підтримуваною корпорацією Oracle Corporation. Вона відзначається високою гнучкістю та здатністю підтримувати різноманітні моделі даних у межах однієї бази даних, зокрема моделі документів, графів, реляційної моделі та моделі ключ-значення, що дозволяє ефективно обробляти різні типи даних і забезпечує високий рівень інтеграції та масштабованості системи. Останні версії Oracle 12c орієнтовані на хмарні обчислювальні платформи, що дозволяє користувачам розгортати бази даних у гібридних або публічних хмарах, а також забезпечує додаткові можливості для автоматизації та управління ресурсами [38].

Ліцензування Oracle Database Engine є повністю запатентованим, що означає відсутність відкритого доступу до вихідного коду. Доступні як безкоштовні, так і платні ліцензійні опції, що дозволяє обрати рішення відповідно до масштабів та бюджету організації. В межах системи використовуються додаткові мови програмування, зокрема процедурно-орієнтована мова

PL/SQL, яка розширює функціональність стандартного SQL, а також мова Java, що забезпечує можливість розробки складних додатків і процедур безпосередньо у середовищі бази даних.

Система Oracle 12c є високоєфективним і гнучким рішенням для застосувань, таких як онлайн-транзакційні обробки (OLTP), сховища даних (Data Warehouse) та змішані (OLTP і Data Warehouse) системи. Вона особливо підходить для організацій із великими об'ємами даних – мільярдами записів – та достатнім бюджетом для підтримки та експлуатації. В умовах сучасних вимог до безпеки, масштабованості та високої продуктивності, Oracle Hybrid Cloud пропонує надійне і технологічно передове рішення для корпоративного сегменту.

DynamoDB – це безсерверна база даних NoSQL, розроблена компанією Amazon для підтримки свого інтернет-магазину, що стала доступною для розробників у 2012 році на платформі хмарного хостингу Amazon Web Services (AWS). Як і у випадку з магазином Amazon, DynamoDB відповідає на запити без обчислювальних витрат, необхідних для виконання складних з'єднань в реляційній базі даних. Оптимізоване для масштабування, це сховище елементів «ключ-значення», де всі дані, що відносяться до певного ключа, зберігаються разом з ним [39].

DynamoDB можна використовувати з програмами, що працюють під управлінням будь-яких операційних систем, включаючи Linux, Windows, iOS, Android, Solaris, AIX та HP-UX, вона легко інтегрується з різними мовами програмування та фреймворками.

Клієнти зі сфери фінансового обслуговування вибирають DynamoDB через стійкість, безпеку, продуктивність і масштабованість. DynamoDB допомагає дотримуватись галузевих норм та стандартів, включаючи SOC 1/2/3, PCI, FINMA та ISO. Також DynamoDB підходить для розробки програмних додатків в масштабі Інтернету з підтримкою метаданих контенту користувача і кешу, що вимагають паралельного підключення мільйонів користувачів і відправлення мільйонів запитів в секунду. Створення сховищ для мультимедійних метаданих з DynamoDB дозволить збільшити пропускну здатність та можливості паралельного запуску робочих навантажень мультимедіа та сфери розваг, таких як потокова передача відео в реальному часі та інтерактивний контент, а також забезпечити низьку затримку завдяки реплікації у кількох регіонах AWS. Для роздрібної торгівлі добре підходять проєктні шаблони для розгортання кошиків інтернет-магазинів, сервісів робочих процесів, відстеження запасів та ведення профілів клієнтів. DynamoDB підтримує події з високим трафіком та у великому масштабі та може обробляти мільйони запитів на секунду. Часто DynamoDB вибирають для масштабування ігрових платформ.

СУБД Firebase, що належить Google, це серверна частина та служба, яка використовується для розробки веб- та мобільного програмного забезпечення. Взагалі,

існує два варіанти: база даних Firebase (забезпечує доступ в режимі реального часу до даних, що знаходяться на різних платформах) та хмарний магазин Firestore (забезпечує більшу масштабованість та складніші моделі даних). Таким чином, обидва рішення чудово вписуються в сценарій, коли потрібно мати справу з великою кількістю даних у режимі реального часу: зміни до БД витягуються в міру їх виникнення [40].

СУБД Firebase рекомендується використовувати, коли програмне забезпечення має справу з даними в реальному часі, які необхідно синхронізувати між різними браузерами та пристроями. Типовий вибір: програми для обміну повідомленнями, програми для соціальних мереж та ігрові програми.

У таблиці 2 наведено порівняльний аналіз деяких параметрів найпопулярніших СУБД на сучасний момент.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз параметрів СУБД

№ п/п	СУБД	Тип	Розробник	Операційна система	Ліцензія	Вихідний код	Підтримка SQL	Ммасштабування	Підтримка
1	Oracle Database	Мульти-модельна	Oracle Corporation	Linux, Microsoft Windows, Oracle Solaris, IBM AIX, HP-UX	Комерційна	***	+	По вертикалі та горизонталі	Платна
2	MySQL	Реляційна	Oracle Corporation	Linux, Microsoft Windows, Oracle Solaris, macOS, FreeBSD	GNU GPL та комерційна	*	+	Обмежено	Платна
3	SQL Server	Реляційна	Microsoft	Linux, Microsoft Windows	Комерційна	***	+	По вертикалі та горизонталі	Безкоштовна
4	PostgreSQL	Об'єктно-реляційна	PostgreSQL Global Development Group	Linux, Microsoft Windows, Oracle Solaris, IBM AIX, macOS, HP-UX, QNX	Вільне та відкрите програмне забезпечення, дозвольна ліцензія	*	+	По вертикалі	Платна
5	MongoDB	Документно-орієнтовна	MongoDB Inc.	Linux, Microsoft Windows, Oracle Solaris, FreeBSD, macOS	GNU AGPL (СУБД) и Apache License (драйвери)	*	-	По горизонталі через шардинг, реплікацію	Платна
6	MariaDB	Реляційна	MariaDB Corporation Ab, MariaDB Foundation	Linux, Microsoft Windows, Oracle Solaris, FreeBSD, macOS	GNU GPL	*	+	По горизонталі, реплікація, кластеризація	Платна, велика спільнота
7	SQLite	Реляційна	SQLite Consortium	Windows, macOS, Linux, Android, iOS та інші.	public domain (вільна ліцензія)	*	+	Обмежено	Платна
8	Redis	In-memory сховище ключ-значення	Salvatore "Antirez" Sanfilippo.	Linux, Windows (через підміну або емуляцію), macOS, FreeBSD та ін.	BSD-ліцензія (переважно)	*	-	По горизонталі, реплікація.	Платна, велика спільнота
9	Elasticsearch	Документно-орієнтована пошукова і аналітична система	Elastic NV	Linux, Windows, macOS, Docker, Kubernetes	Відкрита ліцензія, є комерційні версії	**	+	По горизонталі, кластеризація	Платна, активна спільнота

Продовження таблиці 2

№ п/п	СУБД	Тип	Розробник	Операційна система	Ліцензія	Вихідний код	Підтримка	Масштабування	Підтримка
10	DynamoDB	Ключ-значення та документо-орієнтована модель	Amazon Web Services (AWS)	Веб-сервіс, хмарна платформа (не залежить від ОС клієнта)	Платна послуга за моделлю оплати за використанням (pay-as-you-go)	***	+	Автоматичне масштабування у відповідь на навантаження	Безкоштовне
11	Firestore	Cloud Platform / Backend-as-a-Service (BaaS)	Google	Android, iOS, Web, Unity	Є комерційна і безкоштовна моделі	***	-	Автоматичне масштабування	Безкоштовне

* - Відкритий код; ** - Частково відкритий код; *** – Закритий код

З представленого спектру СУБД можна обрати ту, яка повністю відповідатиме специфічним потребам будь-якого підприємства. Наявність різноманітних безкоштовних варіантів дозволяє малим компаніям знайти оптимальний інструмент для ефективного управління базами даних, що відповідає їхнім вимогам і бюджету. Водночас, для великих підприємств або тих, хто потребує більш розвинених функцій, існує широкий вибір комерційних СУБД з додатковими можливостями та розширеним функціоналом. Це забезпечує гнучкість у підборі рішення, яке максимально відповідатиме складності та масштабом бізнес-процесів.

Висновки

У ході дослідження було проаналізовано підходи до побудови СУБД, надано увагу CAP-теоремі та перспективам розвитку описаних технологій в напрямку хмарних технологій. Заторгнуті питання взаємодії СУБД з ОС та технологіям in-memory та ODBC.

Дослідження включає аналіз останніх публікацій, які підтвердили, що обміркований вибір СУБД потребує аналізу за багатьма критеріями і є нетривіальною задачею. Огляд літератури також показав, що дослідження у цьому напрямку є актуальними, затребуваними та забезпечують зручність і доступність в виборі оптимального програмного забезпечення.

Для порівняльного аналізу розглянуть 11 найпопулярніших СУБД станом на 2024 рік, наведено їх особливості, переваги та недоліки, надано рекомендації для більш вдалого застосування.

Перелік використаних джерел

- [1] Shah A., Bhatt N. A systematic review of in-memory database over multi-tenancy. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2024. Vol. 14, no. 2. Pp. 1720-1729. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v14i2.pp1720-1729>.
- [2] Измайлова О. В. Проектирование информационных систем: навч. посіб. Київ: КНУБА, 2022. 88 с.
- [3] The most popular database management systems. URL: <https://db-engines.com/> (дата звернення 15.01.2025).
- [4] Quantifying and generalizing the CAP theorem / E.A. Lee et al. arXiv preprint. arXiv:2109.07771. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.07771>.
- [5] Iglesias M.J.F. Brief introduction to database systems. Technical Report. 2023. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35951.30884>.
- [6] Meier A., Kaufmann M. SQL & NoSQL databases. Models, Languages, Consistency Options and Architectures for Big Data Management. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. 229 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24549-8>.
- [7] Kaufmann M., Meier A. Datenbanksicherheit. SQL- & NoSQL-Datenbanken. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2023. Pp. 125-178. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-67092-7_4.
- [8] Nosql: Future of bigdata analytics characteristics and comparison with RDBMS / M. Arshad et al. *The Effect of Information Technology on Business and Marketing Intelligence Systems*. Cham : Springer International Publishing, 2023. Pp. 1927-1951. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-12382-5_106.
- [9] Tamer Özsu M., Valduriez P. Principles of distributed database systems. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1999. 674 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26253-2>.
- [10] Santos V. Data Modeling for Connected Data--A systematic literature review. arXiv preprint. arXiv:2410.10081. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.10081>.
- [11] Mostafa S.A., AbuSalim S.W., Saringat M.Z. A Comparative Study of Data Management Systems. *Journal of Soft Computing and Data Mining*. 2020. Vol. 1, no. 1. Pp. 10-16. DOI: <https://doi.org/10.30880/jscdm.2020.01.01.002>.
- [12] Sinha R. A Comparative Analysis on different aspects of Database Management System. *JASC: Journal of Applied Science and Computations*. 2019. No. 1076-

5131. Pp. 2650-2667. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20503.50083>.
- [13] Vágner A. How Do NoSQL Databases Handle Variety of Big Data? *Proceedings of Ninth International Congress on Information and Communication Technology*, London, United Kingdom, 19-22 February 2024. Vol. 2. Pp. 459-469. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-3556-3_37.
- [14] Illian M., Zinda C., Schlangenotto D. Data Store Architectures: Balancing Functionality and Performance. *2024 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Bristol, United Kingdom, 25-27 March 2024. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT58233.2024.10540811>.
- [15] A comprehensive and systematic literature review on the big data management techniques in the internet of things / Naghib A., Jafari Navimipour N., Hosseinzadeh M., Sharifi A. *Wireless Networks*. 2023. Vol. 29. Pp. 1085-1144. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11276-022-03177-5>.
- [16] Fadelmoula A.A. Exploiting Cloud Computing and Web Services to Achieve Data Consistency, Availability, and Partition Tolerance in the Large-Scale Pervasive Systems. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. 2021. Vol. 15, no. 15. Pp. 74-102. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i15.22517>.
- [17] Cuares F., Teleron J.I. Harmony in Nodes: Exploring Efficiency and Resilience in Distributed Systems. *Engineering and Technology Journal*. 2024. Vol. 9, no. 5. Pp. 4127-4136. DOI: <https://doi.org/10.47191/etj/v9i05.32>.
- [18] Consistency vs. availability in distributed real-time systems / E.A. Lee et al. arXiv preprint. arXiv:2301.08906. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.08906>.
- [19] Vikiru A., Muiruri M., Ateya I. An overview on cloud distributed databases for business environments. arXiv preprint. arXiv:2301.10673. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.10673>.
- [20] Miryala N.K. NoSQL Database Services in Cloud—Overview Study. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. 2024. Vol. 13, no. 5. Pp. 637-647. DOI: <https://doi.org/10.17148/IJARCC.2024.13597>.
- [21] Hussein D.L. Evaluating Aggregate Functions and Machine Learning Integration: A Comparative Analysis of Performance, Security, and NoSQL Connectivity in Oracle, SQL Server, and MySQL. *UHD Journal of Science and Technology*. 2024. Vol. 8, no. 2. Pp. 7-23. DOI: <https://doi.org/10.21928/uhdjst.v8n2y2024.pp7-23>.
- [22] Chai S., Qin Z. A Case Study of Cloud Query Performance Comparison Between SQL and NoSQL Database. *2024 IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT)*, Bangkok, Thailand, 09-12 December 2024. Pp. 716-721. DOI: <https://doi.org/10.1109/WI-IAT62293.2024.00117>.
- [23] SQL and NoSQL database software architecture performance analysis and assessments – a systematic literature review / W. Khan et al. *Big Data and Cognitive Computing*. 2023. Vol. 7, no. 2. Article 97. DOI: <https://doi.org/10.3390/bdcc7020097>.
- [24] DBOS: a DBMS-oriented operating system / A. Skia-dopoulos et al. *Proceedings of the VLDB Endowment*. 2021. Vol. 15, no. 1. Pp. 21-30. DOI: <https://doi.org/10.14778/3485450.3485454>.
- [25] Bansal N., Sachdeva S., Awasthi L.K. Database Migration Tools: From RDB to NoSQL Database. *New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques*. 2022. Pp. 563-570. DOI: <https://doi.org/10.3233/FAIA220285>.
- [26] Sciore E. Database Design and Implementation. 2-nd ed. Springer Cham, 2020. 458 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33836-7>.
- [27] Tripathi N. NoSQL database education: A review of models, tools and teaching methods. *Journal of Systems and Software*. 2025. Vol. 226. Article 112391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2025.112391>.
- [28] Valdúriez P., Jimenez-Peris R., Özsu M.T. Distributed database systems: The case for NewSQL. *Transactions on Large-Scale Data- and Knowledge-Centered Systems XLVIII*. 2021. Pp. 1-15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-63519-3_1.
- [29] Stack Overflow Developer Survey 2024. URL: <https://insights.stackoverflow.com/survey/2024> (дата звернення 18.01.2025).
- [30] The PostgreSQL Global Development Group. URL: <https://www.postgresql.org/about/> (дата звернення 18.01.2025).
- [31] The official website MySQL. URL: <https://www.mysql.com/> (дата звернення 25.01.2025).
- [32] SQLite Home Page. URL: <https://sqlite.org/> (дата звернення 25.01.2025).
- [33] MS SQL Server. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/sql-server> (дата звернення 28.01.2025).
- [34] MongoDB Home Page. URL: <https://www.mongodb.com/products> (дата звернення 28.01.2025).
- [35] Introduction to Redis. URL: <https://redis.io/about/> (дата звернення 30.01.2025).
- [36] MariaDB Foundation. URL: <https://mariadb.org/> (дата звернення 25.01.2025).
- [37] Elasticsearch B.V. URL: <https://www.elastic.co/elasticsearch> (дата звернення 15.01.2025).
- [38] Oracle Home Page. URL: <https://www.oracle.com/> (дата звернення 26.01.2025).
- [39] Amazon Web Services, Inc. and its affiliates. URL: <https://aws.amazon.com/partners/mongodb/> (дата звернення 30.01.2025).
- [40] Firebase Home Page. URL: <https://firebase.google.com/> (дата звернення 30.01.2025).

DATABASE REVIEW FOR SOFTWARE DEVELOPMENT ACROSS DIFFERENT OPERATING SYSTEMS

Vorotnikova Z.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0746-5981>, e-mail: vorotnikova_z_j@pstu.edu

The modern world of databases is characterized by constant changes driven by the emergence of new technologies and the growing needs of businesses. Key trends include: the increasing popularity of cloud databases, which offer scalability and cost savings; active use of NoSQL databases, known for their flexibility; the integration of artificial intelligence and machine learning for process automation; the spread of distributed databases for handling large volumes of data; the rising demand for real-time data analytics; the development of In-Memory Databases (IMDB) technologies for fast computing; and heightened attention to data security. Choosing the correct Database Management System (DBMS) is crucial for the successful operation of software, as it directly impacts performance, scalability, security, and efficiency. Neglecting the features of the operating system can lead to serious problems in the future. Different operating systems have distinct architectural characteristics that influence database performance. For example, some databases, such as Microsoft SQL Server, are optimized for specific OS environments. This research presents an overview of modern database management systems with the aim of selecting the optimal DBMS for specific tasks. The study includes analysis of recent publications confirming that a well-considered choice of a DBMS requires multi-criteria analysis and is a non-trivial task. The literature review also demonstrates that research in this area remains relevant and in demand, providing convenience and accessibility in selecting the most suitable software. The features of 11 of the most popular DBMSs as of 2024 have been examined, a comparative analysis has been conducted, and recommendations for optimal application areas have been provided. The proposed overview facilitates the rational selection of an appropriate DBMS to meet the needs of modern data processing tasks.

Keywords: DBMS, SQL, NoSQL, IMDB, relational database, non-relational database, operating system, CAP theorem.

References

- [1] A. Shah, and N. Bhatt, "A systematic review of in-memory database over multi-tenancy," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 14, no. 2, pp. 1720-1729, 2024. doi: [10.11591/ijece.v14i2.pp1720-1729](#).
- [2] O.V. Izmailova, *Proektuvannia informatsiinykh system: navch. posib.* [Designing information systems: a textbook]. Kyiv, Ukraine: KNUBA Publ., 2022. (Ukr.)
- [3] The most popular database management systems. [Online]. Available: <https://db-engines.com/>. Accessed on: January 10, 2025.
- [4] E. Lee, S. Bateni, S. Lin, M. Lohstroh, and C. Menard, "Quantifying and generalizing the CAP theorem," 2021, *arXiv:2109.07771*. doi: [10.48550/arXiv.2109.07771](#).
- [5] M.J.F. Iglesias, "Brief introduction to database systems," Technical Report, 2023. doi: [10.13140/RG.2.2.35951.30884](#).
- [6] A. Meier, and M. Kaufmann, *SQL & NoSQL databases. Models, Languages, Consistency Options and Architectures for Big Data Management*. Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. doi: [10.1007/978-3-658-24549-8](#).
- [7] M. Kaufmann, and A. Meier, "Datenbanksicherheit," in *SQL- & NoSQL-Datenbanken*, Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2023, pp. 125-178. doi: [10.1007/978-3-662-67092-7_4](#). (Ger.)
- [8] M. Arshad, M. Brohi, T. Soomro, T. Ghazal, H. Alzoubi, and M. Alshurideh, "Nosql: Future of bigdata analytics characteristics and comparison with RDBMS," in *The Effect of Information Technology on Business and Marketing Intelligence Systems*, Cham : Springer International Publishing, 2023, pp. 1927-1951. doi: [10.1007/978-3-031-12382-5_106](#).
- [9] M. Tamer Özsu, and P. Valduriez, *Principles of distributed database systems*. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1999. doi: [10.1007/978-3-030-26253-2](#).
- [10] V. Santos, "Data Modeling for Connected Data--A systematic literature review," 2024, *arXiv:2410.10081*. doi: [10.48550/arXiv.2410.10081](#).
- [11] S.A. Mostafa, S.W. AbuSalim, and M.Z. Saringat, "A Comparative Study of Data Management Systems," *Journal of Soft Computing and Data Mining*, vol. 1, no. 1, pp. 10-16, 2020. doi: [10.30880/jscdm.2020.01.01.002](#).
- [12] R. Sinha, "A Comparative Analysis on different aspects of Database Management System," *JASC: Journal of Applied Science and Computations*, no. 1076-5131, pp. 2650-2667, 2019. doi: [10.13140/RG.2.2.20503.50083](#).
- [13] A. Vágner, "How Do NoSQL Databases Handle Variety of Big Data?," in *Proc. of 9-th Int. Congress on Information and Communication Technology*, London, United Kingdom, February 19-22, 2024, vol. 2, pp. 459-469. doi: [10.1007/978-981-97-3556-3_37](#).
- [14] M. Illian, C. Zinda, and D. Schlangenotto, "Data Store Architectures: Balancing Functionality and Performance," in *Proc. of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Bristol, United Kingdom, March 25-27, 2024, pp. 1-6. doi: [10.1109/ICIT58233.2024.10540811](#).

- [15] A. Naghib, N. Jafari Navimipour, M. Hosseinzadeh, and A. Sharifi, "A comprehensive and systematic literature review on the big data management techniques in the internet of things," *Wireless Networks*, vol. 29, pp. 1085-1144, 2023. doi: 10.1007/s11276-022-03177-5.
- [16] A.A. Fadelelmoula, "Exploiting Cloud Computing and Web Services to Achieve Data Consistency, Availability, and Partition Tolerance in the Large-Scale Pervasive Systems," *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 15, no. 15, pp. 74-102, 2021. doi: 10.3991/ijim.v15i15.22517.
- [17] F. Cuare, and J.I. Teleron, "Harmony in Nodes: Exploring Efficiency and Resilience in Distributed Systems," *Engineering and Technology Journal*, vol. 9, no. 5, pp. 4127-4136, 2024. doi: 10.47191/etj/v9i05.32.
- [18] E. Lee, R. Akella, S. Bateni, S. Lin, M. Lohstroh, and C. Menard, "Consistency vs. availability in distributed real-time systems," 2023, *arXiv:2301.08906*. 2023. doi: 10.48550/arXiv.2301.08906.
- [19] A. Vikiru, M. Muiruri, and I. Ateya, "An overview on cloud distributed databases for business environments," 2023, *arXiv:2301.10673*. doi: 10.48550/arXiv.2301.10673.
- [20] N.K. Miryala, "NoSQL Database Services in Cloud–Overview Study," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 637-647, 2024. doi: 10.17148/IJARCC.2024.13597.
- [21] D.L. Hussein, "Evaluating Aggregate Functions and Machine Learning Integration: A Comparative Analysis of Performance, Security, and NoSQL Connectivity in Oracle, SQL Server, and MySQL," *UHD Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 7-23, 2024. doi: 10.21928/uhdjst.v8n2y2024.pp7-23.
- [22] S. Chai, and Z. Qin, "A Case Study of Cloud Query Performance Comparison Between SQL and NoSQL Database," in *Proc. of the 2024 IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT)*, Bangkok, Thailand, December 09-12, 2024, pp. 716-721. doi: 10.1109/WI-IAT62293.2024.00117.
- [23] W. Khan, T. Kumar, C. Zhang, K. Raj, A. Roy, and B. Luo, "SQL and NoSQL database software architecture performance analysis and assessments – a systematic literature review," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 7, no. 2, article 97, 2023. doi: 10.3390/bdcc7020097.
- [24] A. Skiadopoulos et al., "DBOS: a DBMS-oriented operating system," in *Proc. of the VLDB Endowment*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 21-30. doi: 10.14778/3485450.3485454.
- [25] N. Bansal, S. Sachdeva, and L.K. Awasthi, "Database Migration Tools: From RDB to NoSQL Database," in *New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques*, 2022, pp. 563-570. doi: 10.3233/FAIA220285.
- [26] E. Sciore, *Database Design and Implementation*, 2-nd ed. Springer Cham, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-33836-7.
- [27] N. Tripathi, "NoSQL database education: A review of models, tools and teaching methods," *Journal of Systems and Software*, vol. 226, article 112391, 2025. doi: 10.1016/j.jss.2025.112391.
- [28] P. Valdureiz, R. Jimenez-Peris, and M.T. Özsu, "Distributed database systems: The case for NewSQL," *Transactions on Large-Scale Data- and Knowledge-Centered Systems XLVIII*, pp. 1-15, 2021. doi: 10.1007/978-3-662-63519-3_1.
- [29] Stack Overflow Developer Survey 2024. [Online]. Available: <https://insights.stackoverflow.com/survey/2024>. Accessed on: January 18, 2025.
- [30] The PostgreSQL Global Development Group. [Online]. Available: <https://www.postgresql.org/about/>. Accessed on: January 18, 2025.
- [31] The official website MySQL. [Online]. Available: <https://www.mysql.com/>. Accessed on: January 25, 2025.
- [32] SQLite Home Page. URL: <https://sqlite.org/>. Accessed on: January 25, 2025.
- [33] MS SQL Server. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/sql-server>. Accessed on: January 28, 2025.
- [34] MongoDB Home Page. [Online]. Available: <https://www.mongodb.com/products>. Accessed on: January 28, 2025.
- [35] Introduction to Redis. [Online]. Available: <https://redis.io/about/>. Accessed on: January 30, 2025.
- [36] MariaDB Foundation. URL: <https://mariadb.org/>. Accessed on: January 28, 2025.
- [37] Elasticsearch B.V. [Online]. Available: <https://www.elastic.co/elasticsearch>. Accessed on: January 15, 2025.
- [38] Oracle Home Page. URL: <https://www.oracle.com/>. Accessed on: January 26, 2025.
- [39] Amazon Web Services, Inc. and its affiliates. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/partners/mongodb/>. Accessed on: January 30, 2025.
- [40] Firebase Home Page. [Online]. Available: <https://firebase.google.com/>. Accessed on: January 30, 2025.

Стаття надійшла 16.08.2025

Стаття прийнята 01.07.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Воротнікова З. Є. Огляд баз даних при розробці програмного забезпечення для різних операційних систем. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 19-31. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344596>.

РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТУ КОРЕКЦІЇ КОЛЬОРІВ
ДЛЯ КОРИСТУВАЧІВ ІЗ ПОРУШЕННЯМ КОЛЬОРОСПРИЙНЯТТЯ

Проніна О.І.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7085-8027 , e-mail: pronina_o_i@pstu.edu ;
П'ятикоп О.Є.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7731-3051 , e-mail: piatykop_o_je@pstu.edu ;
Перцев Є.А.	магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, e-mail: pertsev_y_a@students.pstu.edu

Візуальне сприйняття є основним каналом отримання інформації про навколишній світ, тому втрата або спотворення кольорів призводить до неповного уявлення про дійсність. У даній роботі розглядається проблема сприйняття кольорів людьми з різними формами дальтонізму та можливі підходи до її вирішення засобами інформаційних технологій. Дослідження спрямоване на створення програмного рішення, яке забезпечує автоматичну обробку кольорів на цифровому зображенні та їх інтерпретацію у зручній для користувача формі. Основна мета полягає у розробленні додатку, що допомагає користувачам ідентифікувати кольори, присутні на обраній картинці, і краще розуміти їх відмінності. Програмний продукт реалізовано мовою Python із використанням бібліотек PySide6 (Qt) та OpenCV. Він забезпечує низку функцій: збільшення фрагмента зображення, відображення кольору у форматах RGB, HSV, LAB або у вербальній формі, зафарбування суміжних областей, симуляцію дальтонізму на основі матриць автора Machado, а також кольорову корекцію (дальтонізацію), що підвищує контрастність і помітність об'єктів. Особливу увагу приділено процедурі лінеаризації sRGB перед застосуванням матриць перетворення, що забезпечує точність обчислень. Запропоноване рішення поєднує алгоритми аналізу кольорових компонентів із засобами візуальної корекції, що дозволяє покращити сприйняття та інтерпретацію візуальних даних. Проведено експериментальне порівняння результатів, отриманих за допомогою розробленого додатку, із даними системи Color Vision Simulator. Аналіз піксельних відмінностей у кольорних моделях показав незначні розбіжності, що підтверджує коректність реалізованих алгоритмів. Розроблений інструмент сприяє підвищенню доступності візуальної інформації та може бути корисним як для осіб із порушеннями кольоросприйняття, так і для фахівців у галузі дизайну, освіти та цифрової графіки. У перспективі планується оптимізація алгоритмів для роботи у реальному часі та розширення підтримки форматів зображень, що дозволить використовувати програму у веб-застосунках і системах інклюзивного дизайну.

Ключові слова: програмне забезпечення, дальтонізм, обробка зображень, Python, OpenCV, кольорова корекція.

Постановка проблеми

Візуальне сприйняття навколишнього середовища є головним методом отримання інформації, тому втрата кольорів означає втрату інформації про навколишній світ, неповну картину сприйняття. Саме через це дуже важливим є визначення і корекція кольорів. У сучасному суспільстві люди проводять значну частину часу за мобільними телефонами та комп'ютерами, що робить якість сприйняття візуальної інформації особливо важливою. Для осіб із порушеннями кольоросприйняття (дальтонізмом) це може створювати додаткові труднощі при взаємодії з цифровими пристроями та контентом.

Дальтонізм є доволі поширеним захворюванням у світі: приблизно 8% чоловіків і 0,5% жінок страждають на кольорову сліпоту. Це сотні мільйонів людей по всьому світу [1]. Хоч хвороба і не є смертельно небезпечною, а деякі види взагалі вважаються особливістю зору, вона може спричиняти дискомфорт, створювати неточну картину навколишнього світу у свідомості людини.

Дальтонізм зазвичай передається у спадок, проте його можуть спричинити і зовнішні чинники: хвороби,

фізичні пошкодження сітківки або зорового нерву, старіння. Найчастіше внаслідок цього з'являються труднощі в розрізненні синього та жовтого кольорів. Аналіз показує, що проблема дальтонізму є достатньо серйозною та різносторонньою [2].

Дальтонізм буває різним, це залежить від того, які колбочки ока пошкоджені (або навіть відсутні). Якщо колбочки є, але дефектні, існує різна ступінь чутливості до світла:

- Протанопія (відсутність L-колбочок або їх дефектність (протаномалія)) – зміни сприйняття червоного кольору, сприйманий спектр укорочений з червоного кінця. Червоний колір сприймається темнішим, змішується з темно-зеленим, темно-коричневим, а зелений – зі світло-сірим, ясно-жовтим, світло-коричневим.

- Дейтеранопія (відсутність M-колбочок або їх дефектність (дейтераномалія)) – зміни сприйняття зеленого кольору. Зелений колір змішується зі світло-помаранчевим, ясно-рожевим, а червоний – з ясно-зеленим, світло-коричневим.

- Тританопія (відсутність S-колбочок або їх дефектність (тританомалія)) – відсутність кольорних відчуттів у синьо-фіолетовій області спектра. Зустрічається

вкрай рідко. При тританопії всі кольори спектру ба-
чаться відтінками червоного або зеленого [1].

Колірна сліпота не є виліковною. Існують дослі-
дження та успішні експерименти застосування генної
терапії [3], але це все ще не набуло поширення та підт-
вердження. Але все ж таки людям з нездатністю розрі-
знити кольори можна допомогти. Для цього є різні за-
соби, такі як окуляри, лінзи, додатки на телефони чи
комп'ютери. Так можна допомогти людині сприймати
колір через зовнішні інструменти: спеціальні лінзи,
окуляри (наприклад, Enchroma). Але вони не дають по-
вноцінного результату та не можуть повністю компен-
сувати втрачені кольори. Оскільки сучасна людина
проводить значну частину часу за роботою з комп'юте-
рними пристроями та мобільними телефонами, то ак-
туальним є розроблення програмного забезпечення для
автоматизованого зчитування та перетворення кольо-
рової інформації з цифрових зображень для покращен-
ня його сприйняття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботі [4] розглядається розвиток теоретичних
засад математичної морфології для обробки напрям-
них (векторних або орієнтованих) даних, які виника-
ють у таких задачах, як аналіз текстур, оптичний потік
чи орієнтовані поля візуалізації. Автор формалізує по-
няття морфологічних операторів для векторних струк-
тур, розробляючи нові підходи до впорядкування на-
прямних даних і визначення структурних елементів у
багатовимірному просторі. Стаття поєднує строгий ма-
тематичний апарат із практичними алгоритмічними рі-
шеннями, створюючи підґрунтя для застосування мор-
фологічних методів у сучасних задачах комп'ютерного
зору та цифрової обробки зображень.

Стаття [5] присвячена розгляданню обмежень, що
пов'язані з порушенням зору, обґрунтовується важли-
вість веб-доступності та розглядаються чинні стандар-
ти веб-доступності та найкращі практики для забезпе-
чення доступності веб-контенту для людей з особли-
вими потребами. Веб-доступність аналізується за до-
помогою інструменту Web Disability Simulator, а веб-
контент адаптується до потреб людей з інвалідністю.

В роботі [6] представлено розробку мобільного
додатку, адресованого людям з дальтонізмом. Додаток
складається з двох окремих частин. З одного боку, ав-
тори реалізували колірний тест Ісіхари, щоб дозволити
користувачам дізнатися (або підтвердити), чи мають
вони дальтонізм. З іншого боку, автори розробили ін-
терфейс камери, в якому кольори, які зазвичай викли-
кають плутанину у людей з дальтонізмом, модифіко-
вані для легкого розрізнення.

Автори статті [7] пропонують новий експеримен-
тальний протокол на основі моделювання, де спостері-
гачі без порушення колірному зору оцінюють відносну
естетику та функціональність скріншотів 20 популяр-
них веб-сайтів, як їх видно в повному кольорі, порів-
няно з імітованим порушенням зору. Результати, що

отримані авторами, показують, що відносна естетика
та функціональність позитивно корелюють.

Дослідження [8] було спрямовано на розробку
програмного забезпечення для людей з порушенням
колірного зору для покращення кольору та порівняно з
двома іншими зрілими програмами покращення ко-
льору, що знаходяться в популярних смартфонах з різ-
ними основними операційними системами. Дослі-
дження включало як об'єктивні, так і суб'єктивні оцін-
ки. Матеріали дослідження охоплювали три аспекти:
повсякденне життя, візуалізацію інформації та відео.
Крім того, це дослідження розглядає різні рівні покращення кольору за допомогою трьох вимірів суб'єктивної оцінки: колірний контраст, природність кольору та колірні переваги. Результати показують, що всі функції покращення кольору корисні для людей з порушеннями колірного зору завдяки їх сильному колірному контрасту. Колірні переваги користувачів тісно пов'язані з природністю кольору. Програма-приклад зберігає природність кольорів краще, ніж дві інші функції покращення кольору. Суб'єктивні оцінки показують подібні тенденції в різних операційних системах, з відмінностями, що виникають через використання різних алгоритмів покращення кольору. Таким чином, різні алгоритми можуть призводити до різних розмірів колірної гами.

Аналіз літератури показав, що вдосконалення ро-
боти з візуальною інформацією щодо кольорової корекції є актуальною задачею. Тому дане дослідження спрямоване на створення програмного забезпечення моделювання та корекцію зорового сприйняття осіб з різними формами дальтонізму.

Мета статті

Розробка програмного рішення, яке забезпечує
автоматичну обробку кольорів на цифровому зобра-
женні та їх інтерпретацію у зручній для користувача
формі. В роботі проводяться дослідження можливих
варіантів компенсування дальтонізму. Розроблене про-
грамне забезпечення дозволить проводити адаптацію
кольорової палітри зображення для покращення розрі-
знення кольорів користувачами з порушенням кольо-
росприйняття.

Виклад основного матеріалу

Згідно мети роботи для розробки програмного за-
безпечення було визначено низку функціональних ви-
мог, реалізація яких забезпечить зручність та ефектив-
ність використання додатку кінцевим користувачем.
До основних із них належать:

1) Збільшення фрагмента зображення. Ця функ-
ція забезпечить детальніший перегляд окремої ділянки
зображення, що дозволить точніше визначати кольори
без додаткового зорового напруження.

2) Відображення кольору у текстовому форматі.
Користувач може отримати інформацію про колір у
форматах RGB або HSV, що відображають складові

кольорової моделі. Також можливе відображення назви кольору у зрозумілій вербальній формі (наприклад, «червоний», «синій»), що сприяє кращій ідентифікації та асоціації кольорів.

3) Зафарбування області. Додаток дозволить виконати заливку суміжних пікселів вибраної ділянки середнім або заданим кольором. Це дасть змогу усунути градієнти й отримати чітке виділення певної області без плавних переходів між кольорами.

4) Симуляція дальтонізму. Реалізується можливість моделювання зорового сприйняття осіб з різними формами дальтонізму. Хоча така симуляція не відтворює реальних відчуттів користувачів із вадами кольоросприйняття, вона дозволить наочно оцінити відмінності у сприйнятті кольорів.

5) Кольорова корекція (дальтонізація). Ця функція передбачить адаптацію кольорової палітри зображення для покращення розрізнення кольорів користувачами з порушенням кольоросприйняття. Вона не відновлює оригінальні кольори, однак підвищує контрастність і помітність об'єктів.

Для симуляції дальтонізму вирішено взяти матриці аномалій кольору (протаномалія, дейтераномалія, тританомалія). Уже є розраховані матриці симуляції кольірних аномалій. Тобто розраховано зсув для кожного ступеню тяжкості випадку (від 0 до 1 з кроком 0,1), чим менша ступінь важкості, тим менше виражений дальтонізм [9]. Тож користувач може змінювати повзунок тяжкості і бачити прояви певного типу дальтонізму різного ступеню.

Важливим моментом для зсуву матриці є лінеаризація кольору. Картинки подають sRGB колір – помножений RGB на гамму. Це роблять для ефективнішого показу на моніторі, зберігання. Цей коефіцієнт підсилює яскравість компонентів зображення, і він не є лінійним, а експоненціальним. Тож для отримання чистого зображення треба його лінеаризувати і лише потім застосовувати для зміни в матриці [10]. Для цього використані формули, визначені стандартом щодо sRGB [11].

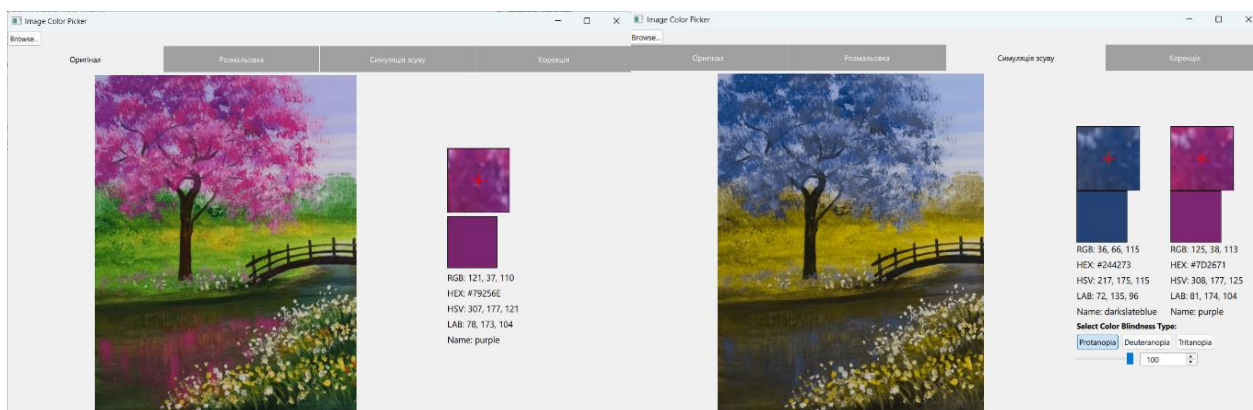
Реалізація програмного забезпечення була виконана за допомогою Python, QT (PySide6, qml), opencv. Розроблене програмне забезпечення має наступну структуру: modules містяться файли python, що відповідають за логіку додатку; у теці qml містяться файли формату qml, які відповідають за зовнішній вигляд застосунку; components – окремі візуальні елементи; pages – вкладки додатку, що містять компоненти. Також є прив'язка до контексту файлів логіки і файлів графічного інтерфейсу.

Розроблено основні чотири види ImageContainer, кожен з яких містить зображення, містить об'єкт (ColorRepresenter), що репрезентує колір у будь-якому вигляді, містить позицію курсора для оновлення поточного кольору або заливки. ImageFloodContainer здатний замальовувати зображення через FloodFiller, ShiftContainer – здійснювати зсув кольорів для симуляції, DaltonizeContainer – для корекції кольору через CVD. Усіх їх тримає ImageProvider, бо саме він відповідає за подання картинки до графічного інтерфейсу в поточний момент. Щодо qml, то там містять лише елементи відображення, найголовніше серед них – прив'язка до моделі.

Для отримання імені кольору використана бібліотека webcolors, в якій близько 150 кольорів. Очевидно, що це не покриває весь спектр можливих кольорів, а тому, при отриманні довільного кольору з зображення, треба з'ясувати, до якого іменованого кольору він найближчий. Для цього використано лінійний пошук (елементів небагато, тому можна просто проітеруватися). Для порівняння з іншими кольорами використано евклідову відстань – найменша відстань означає найближчий іменований колір до обраного. При цьому порівняння проводилося в моделі LAB, бо вона вважається близькою до того, як люди сприймають колір [12]. До того ж, для порівняння кольорів (розрахування різниці кольорів) використання евклідових відстаней є доцільним.

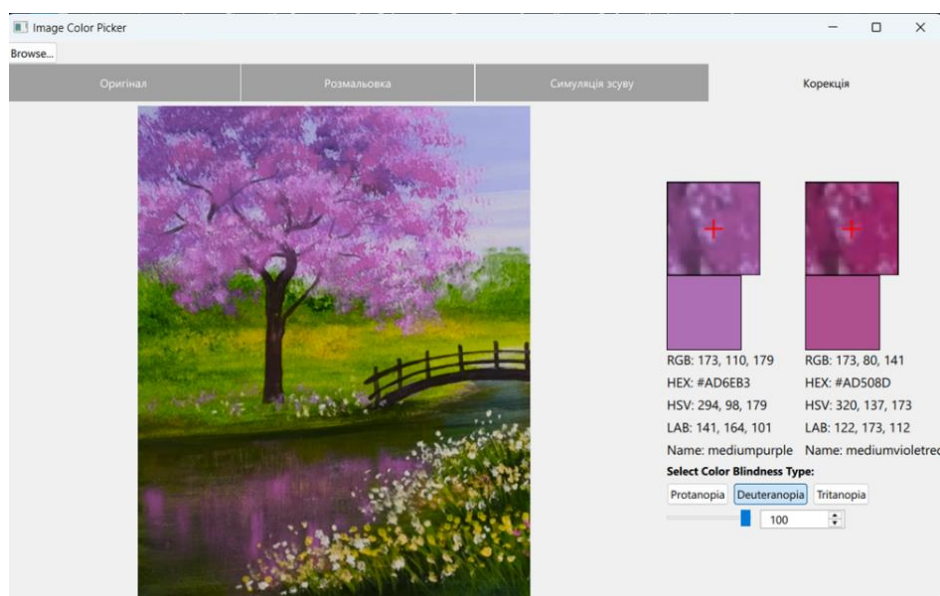
Для заливки області зображення спочатку створюється маска, де розраховуються пікселі, які за певним порогом кольору схожі на зазначений колір. Далі по компоненті зв'язності ця маска накладається на основне зображення, зафарбовуючи потрібну область. Алгоритм схожий на реалізацію від OpenCV [13].

Розроблений програмний продукт бере зображення png і дозволяє користувачу прочитати колір пікселя під курсором: у форматі rgb, lab, hex. Окрім цього є ще заливка, для збільшення контрасту між різними кольорами, за рахунок чого все стає однотонним, не плавним. Також додаток передбачає симуляцію дальтонізму на основі матриць Machado [9]. Це дозволяє симулювати ефекти для дейтераномалії, протаномалії, тританомалії (у заданих відсотках), і корекція зображення (дальтонізація). Також в додатку передбачено при наведенні на картинку у вкладках симуляцій побачити, який піксель був «до» і «після» симуляції різних вад зору. Інтерфейс розробленого програмного забезпечення наведено на рисунку 1.



а) Аналіз оригінального зображення

б) Симуляція зсуву



в) Корекція

Рис. 1 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення з різними режимами роботи

Для перевірки отриманих результатів було виконано експериментальне дослідження, в якому відбувалось попіксельне порівняння з системою, що моделює вади зору [14]. Для цього було вирішено використовувати метод аналізу кольорових відмінностей. Цей метод полягає у визначенні ступеня подібності або різниці між кольорами двох пікселів. Такий аналіз дає змогу оцінити, наскільки або відмінні кольори за своїми числовими характеристиками у певній колірній моделі (наприклад, RGB, HSV чи LAB). Найпростішим підходом є обчислення абсолютної різниці між значеннями кольорових компонент відповідних пікселів. Отримане числове значення характеризує рівень відмінності – чим воно менше, тим ближчі кольори між собою. Абсолютна різниця між пікселями розраховується по формулі:

$$d = \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + (g_1 - g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (1)$$

де r – показник червоного кольору, g – показник зеленого кольору, b – показник блакитного кольору.

Відсоткова різниця між пікселями розраховується по формулі:

$$l = \frac{d}{\sqrt{3 \cdot 255^2}} * 100\% \quad (2)$$

Щоб попіксельно зрівняти результати, було взяте зображення, де виділені пікселі, що мають складову кожного компонента моделі RGB для їх модифікації, рисунок 2.

На рисунку 3 зображено типи вад зору, їх представлення за допомогою розробленого додатку (зліва на рисунку) та за допомогою сторонньої системи (справа на рисунку).

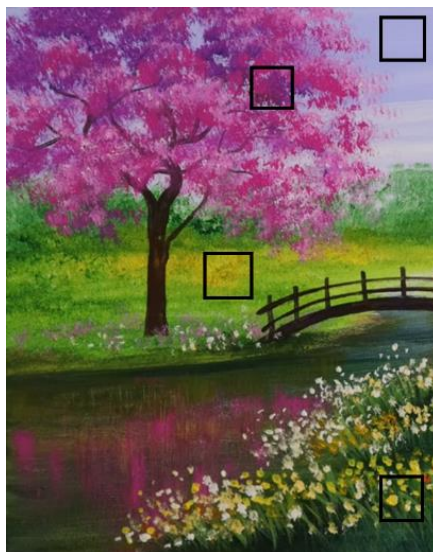


Рис. 2 – Зображення з виділеними пікселями, що підвергалось тесту



а) Протанопія

б) Дейтеранопія

в) Тританопія

Рис. 3 – Порівняння представлення зображень відносно різних вад зору

Таблиця 1

Порівняння результатів дослідження розробленого додатку та системи Color Vision Simulator

Протанопія				
Піксель	Через ПЗ	Через сайт	Абсолютна різниця	Відсоткова Різниця, %
1	158, 175, 217	158, 168, 214	7,615773106	1,724301432
2	34, 63, 101	35, 70, 138	37,6696164	8,528848302
3	177, 156,0	174,155,26	26,19160171	5,930089528
4	191,170,63	195,175,60	7,071067812	1,600973688
Дейтеранопія				
5	156 172 214	167 168 214	11,70469991	2,650082998
6	63 75 105	61 72 103	4,123105626	0,933520056
7	180 161 45	193 145 36	22,49444376	5,093009082
8	194 175 59	212 160 50	25,0998008	5,682892842
Тританопія				
9	158 176 184	164 174 188	7,483315	1,694311
10	123 43 68	114 52 56	17,49286	3,96059
11	192 151 140	187 152 163	23,55844	5,33391
12	204 153 142	200 154 166	24,35159	5,513489

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що відсоткова різниця між результатом, що надає розроблене програмне забезпечення та система Color vision Simulator, є незначною, це в більшому пов'язано з точним розташуванням курсора.

Також після порівняння зображення, що аналізувались, піддавались дальтонізації – методу корекції кольору, який намагається налаштувати кольори таким чином, щоб було менше колірних комбінацій, які могли б заплутати людину з дальтонізмом. Метод не є ідеальним, але в деяких випадках може покращити зображення, щоб зробити його більш зрозумілим для людини з порушеннями кольорового зору. Ця функція призначена для швидкого перетворення кожного кадру ескізу, щоб накладні витрати не впливали на частоту кадрів.

Запропонований підхід сприяє підвищенню доступності візуальної інформації та може бути корисним як для осіб із порушеннями кольоросприйняття, так і для фахівців у галузі дизайну, освіти та цифрової графіки.

Висновки

Під час виконання даної роботи проаналізовано поточний стан проблеми дальтонізму, методи симуляції кольорових аномалій та можливої корекції кольорів. Вирішено розробити додаток, що допомагав би користувачу краще розуміти кольори на зображенні. Для кращого розуміння міститься текстова інформація про колір (у різних кольорових моделях), збільшення зони під курсором, використання однотонної заливки суміжних областей для зниження градієнта. За допомогою Python, QT (PySide6, qml),opencv розроблене програмне забезпечення, яке надає можливість точного визначення кольорових компонентів у вибраній ділянці зображення, що дозволяє користувачеві отримувати об'єктивні дані про колірну палітру в числовому чи візуальному форматі.

Для перевірки точності перетворень проведено експеримент, у ході якого порівнювалися зразки, отримані шляхом симуляцій у власному додатку, зі зразками, отриманими з відомих відкритих ресурсів, що виконують аналогічні завдання. Точність вимірювалася через різницю відповідних пікселів, що відображають різні кольори. Попри наявну похибку, можна вважати, що розроблений продукт співставний з тими, що вже існують. Похибка може бути наявна через відмінність моделей, що реалізують сторонні ресурси. Проте дану модель можна використовувати на рівні з іншими. Додаток може бути корисним для людей, що займаються дизайном для інклюзивних людей, адже можна завжди подивитися зображення у різних формах кольорових аномалій; для тих, хто хоче дослідити кольори на зображенні, для навчання. Також це може бути актуально для самостійного виявлення дальтонізму, проте в жодному разі не варто сприймати результати роботи застосунку як діагноз. У разі занепокоєнь

краще звертатися до відповідного лікаря для обстеження.

Розроблене програмне забезпечення може бути використане у сфері комп'ютерної графіки, цифрової фотографії, дизайну та в системах технічного зору. Практична реалізація результатів дослідження сприяє підвищенню ефективності обробки зображень і розширює можливості їх аналітичного використання.

Поточний функціонал додатку є обмеженим. Основними проблемами є обмежена підтримка зображень різних форматів та нестача додаткових інструментів для підвищення зручності. В подальшому дослідження будуть присвячені підвищенню швидкості перетворень картинок під час симуляції для придатності роботи у режимі реального часу без затримок. Це дозволить аналізувати зображення під час постійних змін і трансляцій, що зробить це актуальним для веб-застосунків і в результаті – доступнішим більшій аудиторії.

Перелік використаних джерел

- [1] Color Blindness – learn all about it. URL: <https://www.color-blindness.com/> (дата звернення: 15.06.2025).
- [2] Almustanyir A. A Global Perspective of Color Vision Deficiency: Awareness, Diagnosis, and Lived Experiences. *Healthcare*. 2025. Vol. 13, № 16. Article 2031. DOI: <https://doi.org/10.3390/healthcare13162031>.
- [3] Франчук Є. Р., Бєлих І. А. Генна терапія вродженого дальтонізму. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. 30-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2022, м. Харків, 19-21 жовтня 2022 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. С. 482. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/62277> (дата звернення: 03.07.2025).
- [4] Hauch K. Mathematical morphology on directional data. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. 2024. Vol. 66, № 3. Pp. 456–474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10851-024-01210-0>.
- [5] Крестьянполь Л., Ковальчук М., Вашкевич О. Вебдоступність як основний засіб руйнування цифрових бар'єрів для людей з обмеженими можливостями. *Прикладні проблеми комп'ютерних наук, безпеки та математики*. 2023. № 1. С. 4-9.
- [6] Vidal-Coll M., Manresa-Yee C. Developing a Color Identification Assistance Application for Individuals with Color Blindness. *Interacción '24: Proceedings of the XXIV International Conference on Human Computer Interaction*, A Coruña, Spain, 19-21 June 2024. 2024. Article № 6. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1145/3657242.3658600>.
- [7] Jamil A., Denes G. Investigating Color-Blind User-Interface Accessibility via Simulated Interfaces. *Computers*. 2024. Vol. 13(2). Article 53. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers13020053>.
- [8] Do color enhancement algorithms improve the experience of color-deficient people? An empirical study

based on smartphones / Y. Zhang et al. *Frontiers in Neuroscience*. 2024. Vol. 18. Pp. 01-10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1366541>.

- [9] Machado G., Oliveira M., Fernandes L. A Physiologically-Based Model for Simulation of Color Vision Deficiency. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2009. Vol. 15, iss. 6. Pp. 1291-1298. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.113>.
- [10] Чому потрібна лінеаризація? URL: <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems3/part-iv-image-effects/chapter-24-importance-being-linear> (дата звернення: 13.08.2025).
- [11] How to interpret the sRGB color space (specified in IEC 61966-2-1) for ICC profiles. URL:

<https://www.w3.org/Graphics/Color/srgb> (дата звернення: 15.08.2025).

- [12] What Is CIELAB Color Space? URL: <https://www.hunterlab.com/blog/what-is-cielab-color-space/> (дата звернення: 15.08.2025).
- [13] Miscellaneous Image Transformations. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d7/d1b/group_imgproc_misc.html#ga45f9e83fca77c21c6174e9d554f3e0a8 (дата звернення: 20.08.2025).
- [14] Color Vision Simulator. URL: <https://pilestone.com/pages/color-blindness-simulator> (дата звернення: 21.08.2025).

DEVELOPING A COLOR CORRECTION TOOL FOR USERS WITH COLOR PERCEPTION DISORDERS

Pronina O.I.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7085-8027 , e-mail: pronina_o_i@pstu.edu ;
Piatykov O.Ye.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7731-3051 , e-mail: piatykov_o_ye@pstu.edu ;
Pertsev Ye.A.	M.Sc., SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, e-mail: pertsev_y_a@students.pstu.edu

Visual perception is the primary means of obtaining information about the surrounding world, so the loss or distortion of color leads to an incomplete understanding of reality. This paper examines the problem of color perception in people with various forms of color blindness and possible approaches to addressing it using information technology. The research aims to create a software solution that automatically processes colors in digital images and interprets them in a user-friendly manner. The primary goal is to develop an application that helps users identify colors present in a selected image and better understand their differences. The software is implemented in Python using the PySide6 (Qt) and OpenCV libraries. It provides a number of functions: image fragment magnification, color display in RGB, HSV, LAB, or verbal formats, shading of adjacent areas, color blindness simulation based on Machado's matrices, and color correction (color shading), which increases contrast and the visibility of objects. Particular attention was paid to the sRGB linearization procedure before applying the transformation matrices, ensuring the accuracy of calculations. The proposed solution combines color component analysis algorithms with visual correction tools, improving the perception and interpretation of visual data. An experimental comparison of the results obtained using the developed application with data from the Color Vision Simulator system was conducted. An analysis of pixel-by-pixel differences in the color models revealed minor discrepancies, confirming the correctness of the implemented algorithms. The proposed approach can be useful for individuals with color vision impairments, as well as for specialists in design, education, and digital graphics. The developed tool improves the accessibility of visual information and can be useful for individuals with color vision impairments, as well as for specialists in design, education, and digital graphics. Future plans include optimizing the algorithms in real time and expanding image format support, enabling the program to be used in web applications and inclusive design systems.

Keywords: software, color blindness, image processing, Python, OpenCV, color correction.

References

- [1] Color Blindness – learn all about it. [Online]. Available: <https://www.color-blindness.com/>. Accessed on: June 15, 2025.
- [2] A. Almustanyir, “A Global Perspective of Color Vision Deficiency: Awareness, Diagnosis, and Lived Experiences,” *Healthcare*, vol. 13, № 16, article 2031, 2025. doi: 10.3390/healthcare13162031.
- [3] Ye.R. Franchuk, and I. A. Byelykh, “Henna terapiya vrodzhenoho dal'tonizmu” [«Gene therapy for congenital color blindness»], in *Proc. Of the 30-th Int. sci.-pract. conf. «Information technologies: science, engineering, technology, education, health MicroCAD-2022»*, Kharkiv, Oct. 19-21, 2022, pp. 482. Online]. Available: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/62277>. Accessed on: July 03, 2025. (Ukr.)

- [4] K. Hauch, "Mathematical morphology on directional data," *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, vol. 66, № 3, pp. 456-474, 2024. doi: [10.1007/s10851-024-01210-0](https://doi.org/10.1007/s10851-024-01210-0).
- [5] L.Y. Krestyanpol, M.S. Kovalchuk, and O.M. Vashkevich, "Vebdostupnist yak osnovnyi zasib ruinuвання tsyfrovyykh barieriv dlia liudei z obmezhenymy mozhlyvostiamy" ["Web accessibility as the main tool for breaking digital barriers for people with disabilities"], *Prykladni problemy kompiuternykh nauk, bezpeky ta matematyky – Applied Problems of Computer Science, Security and Mathematics*, № 1, pp. 4-9, 2023. (Ukr.)
- [6] M. Vidal-Coll, and C. Manresa-Yee, "Developing a Color Identification Assistance Application for Individuals with Color Blindness," in *Proc. of the XXIV Int. Conf. on Human Computer Interaction «Interacción '24»*, A Coruña, Spain, June 19-21, 2024, article № 6, pp. 1-5. doi: [10.1145/3657242.3658600](https://doi.org/10.1145/3657242.3658600).
- [7] A. Jamil, and G. Denes, "Investigating Color-Blind User-Interface Accessibility via Simulated Interfaces," *Computers*, vol. 13(2), article 53, 2024. doi: [10.3390/computers13020053](https://doi.org/10.3390/computers13020053).
- [8] Y. Zhang, Y. Hu, J. Tan, R. Ma, F. Si, and Y. Yang, "Do color enhancement algorithms improve the experience of color-deficient people? An empirical study based on smartphones," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 18, pp. 01-10, 2024. doi: [10.3389/fnins.2024.1366541](https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1366541).
- [9] G. Machado, M. Oliveira, and L. Fernandes, "A Physiologically-Based Model for Simulation of Color Vision Deficiency," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 15, iss. 6, pp. 1291-1298, 2009. doi: [10.1109/TVCG.2009.113](https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.113).
- [10] Chomu potribna linearyzatsiya? [Why linearization is needed] [Online]. Available: <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems3/part-iv-image-effects/chapter-24-importance-being-linear>. Accessed on: May 19, 2014. (Ukr)
- [11] How to interpret the sRGB color space (specified in IEC 61966-2-1) for ICC profiles. [Online]. Available: <https://www.w3.org/Graphics/Color/srgb>. Accessed on: August 15, 2025.
- [12] What Is CIELAB Color Space? [Online]. Available: <https://www.hunterlab.com/blog/what-is-cielab-color-space/>. Accessed on: August 15, 2025.
- [13] Miscellaneous Image Transformations. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/d7/d1b/group_imgproc_misc.html#ga45f9e83fca77c21c6174e9d554f3e0a8. Accessed on: August 20, 2025.
- [14] Color Vision Simulator. [Online]. Available: <https://pilestone.com/pages/color-blindness-simulator>. Accessed on: August 21, 2025.

Стаття надійшла 30.09.2025

Стаття прийнята 14.10.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Проніна О. І., П'ятикоп О. Є., Перцев Є. А. Розробка інструменту корекції кольорів для користувачів із порушенням кольоро-сприйняття. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 32-39. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344598>.

ПОГЛЯД НА РІЗНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ
В ТЕХНІЧНІЙ ТВОРЧОСТІ

Дан Л.О.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1954-4871 , e-mail: danleonid.alex@gmail.com ;
Трофімова Л.О.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4576-2589 , e-mail: trofimova.pstu@gmail.com

Успішне застосування прийомів та методів технічної творчості завжди ґрунтувалося та ґрунтується на врахуванні сучасних тенденцій розвитку науки, техніки, виробництва. Віднедавна використання штучного інтелекту стало повсюдним. Технічна творчість, що довгий час була прерогативою людини, теж попала під вплив цього тренду. Дана стаття спрямована на аналіз позитивних та негативних сторін взаємодії людини та штучного інтелекту в процесі розв'язання різноманітних технічних проблем. Спочатку розглянуто загальні засади та можливі наслідки співпраці «тандему» людина – ШІ в науці і техніці. Висловлено впевненість, що провідну роль в цій взаємодії має відігравати людина, а штучний інтелект – бути лише знаряддям, хоча дуже ефективним і корисним. Водночас висвітлені підводні каміння залучення штучного інтелекту до творчого процесу в сфері діяльності, що аналізується. Далі на прикладах залучення штучного інтелекту при реалізації найбільш поширених прийомів пошуку технічних рішень, таких як метод проб та помилок, асоціативні методи, мозковий штурм, конкретизуються позитивні та негативні наслідки цього залучення. По закінченню аналізу автори узагальнюють свої думки стосовно порушеної проблеми та роблять висновки, головним з яких є те, що ШІ не може повноцінно замінити людину в сфері технічної творчості. Найкращий результат може бути отримано за гармонічного поєднання можливостей людини та штучного інтелекту.

Ключові слова: технічна творчість, штучний інтелект, метод проб і помилок, аналогія, мозковий штурм.

Постановка проблеми

Науково-технічна революція на сучасному етапі безперервно ускладнює вимоги, що висуваються до випускників вищої технічної школи. У світлі цих вимог однією з головних якостей молодого фахівця є творчий науково-технічний потенціал, здатність самостійно ставити та розв'язувати питання вдосконалення технології й обладнання, питання створення нової техніки, нових матеріалів та методів їх обробки.

У зв'язку з цим, перед системою вищої освіти стоїть завдання навчання здобувачів технічної творчості. В цьому контексті важливим є грамотне використання штучного інтелекту (ШІ) на різних етапах технічної творчості – від формулювання проблеми до пошуків шляхів її вирішення за рахунок більш ефективного застосування різних прийомів, від метода проб і помилок до найскладніших багаторівневих мозкових штурмів. Слід усвідомити, що використання ШІ в різних сферах життя – це вже об'єктивна реальність. Нам слід навчитися ефективно і повноцінно існувати в цій реальності, більш того – керувати нею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Згідно з існуючими дотепер уявленнями термін «Науково-технічна творчість» можна інтерпретувати як цілеспрямовані когнітивні зусилля людини або групи людей на покращення існуючої або створення абсолютно нової технічної системи. Тобто, як ми бачимо, процес науково-технічної творчості має дві складові: об'єктивну і суб'єктивну [1-6]. Перша – це

технічна система, на яку, власно, спрямовано творчий процес. Друга – це суб'єкт творчості, людина або творчий колектив, які цей процес здійснюють. Якщо технічна система розвивається згідно до об'єктивних законів [1-8], то людська складова більш підпорядкована законам психології.

За останні кілька років в зв'язку з вибухоподібним впровадженням штучного інтелекту (ШІ) в різні сфери людської діяльності та суспільного життя, в літературі почали з'являтися публікації, в яких ШІ наділяють когнітивними властивостями [9, 10]. Інтерполюючи висновки цих авторів на осяжне майбутнє, можна припустити, що наступним кроком в розвитку ШІ може стати повне витіснення людини з творчого процесу, в тому числі в сфері науки і техніки.

На підставі аналізу літературних публікацій та власного досвіду спробуємо з'ясувати на скільки це ймовірно і, що більш реально, які можуть бути наслідки взаємодії людини та ШІ при вирішенні науково-технічних завдань.

Мета статті

Аналіз різних аспектів використання ШІ під час здійснення творчого процесу в галузі науки і техніки.

Виклад основного матеріалу

Теорія рішення винахідницьких задач (ТРВЗ) включає більш ніж 40 практичних прийомів, методів та алгоритмів [1, 3, 4, 11, 12]. Вони об'єднують низку евристичних методів, методи мозкового штурму, методи

синектики тощо. Попри різноманіття конкретних підходів та процедур, всі вони мають спільну рису – мотиватором, виконавцем та користувачем результату є людина. При тому, що процес науково-технічної творчості завжди містить пошук рішення в умовах невизначеності, дефіциту інформації, розв'язання завдань залежить як від природних здібностей, так і внутрішнього психологічного стану того, хто розв'язує проблему. Психологи вважають, що і те, і інше під дією зовнішніх чинників може суттєво змінюватися [13-16 та ін.]. А чи може взаємодія людини з ШІ стати таким чинником? І в якому напрямку підуть ці зміни? Думки розійшлися.

Ще на початку 2000-х Маргарет Боден [17] висунула ідею про те, що обчислювальні інструменти, включно з ранніми формами ШІ, можуть служити каталізаторами для людської креативності, відкриваючи нові можливості для дослідження та генерування ідей у різних галузях, зокрема науково-технічних. В пізніших дослідженнях, наприклад [18, 19], наводяться приклади практичного використання ШІ-генеративних програм у винахідницькій діяльності. Дослідження [19] показує, що «дослідники, яким допомагає ШІ, відкривають на 44% більше матеріалів, що призводить до збільшення на 39% кількості поданих патентів і на 17% зростання інновацій у подальшій продукції». Важливо, що переваги ШІ були більш вираженими для провідних дослідників, чия продуктивність майже подвоїлася, що, на думку авторів, підкреслює синергію між людськими навичками та ШІ. На підставі аналізу досліджень причин позитивних результатів взаємодії людини і ШІ, викладених в роботах [18-24], можна виділити найважливіші з них.

Розширення можливостей. В цьому контексті штучний інтелект можна сприймати в якості інструменту. Потужного і швидкого. На його плечі доцільно перекласти трудомістку та складну частину роботи, звільнивши для людини час саме для творчості.

Джерело натхнення та нових ідей. Штучний інтелект може стати «каталізатором» нових рішень за рахунок неординарних комбінацій ідей, до яких людина не дійшла б самотужки.

Сприяння експериментам. За допомогою ШІ є можливість перевірити різні гіпотези без ризику наслідків невдач. Можна припустити, що це буде корисне при «тестуванні» нових конструкцій, таких як мости, будівлі тощо.

Подолання творчих блоків. Час від часу людина стикається з творчим застоєм. В цьому сенсі ШІ за рахунок пропонування оригінальних рішень може сприяти його подоланню.

Персоналізоване навчання та розвиток. Сучасний рівень розвитку ШІ дозволяє аналізувати як хід творчих процесів, так і їх результати та пропонувати людині персоналізовану систему тренінгів та вправ для поліпшення творчих здібностей.

Але не все так однозначно. Вже в 2025 році з'явилася колективна монографія, лейтмотивом якої може бути назва однієї з статей «Negative Effects of Artificial

Intelligence On Human Creativity Ability» [25]. В цій статті та низці інших автори [26-29] наводять міркування та приклади щодо негативного впливу використання ШІ в технічній творчості та творчості взагалі. На підтвердження своєї думки автори [25] наводять непокоїчу статистику. Експериментальне дослідження виявило, що, хоча ШІ може генерувати ідеї, які люди оцінюють високо, існує довгостроковий вплив надмірного використання ШІ на людську креативність (близько 62% респондентів). Дослідження також згадує явище «фіксації» – коли люди не можуть вийти за межі ідей, запропонованих ШІ, що перешкоджає глибокому мисленню та оригінальності.

А яким чином ШІ може пригнічувати здібності людини як творця? Можемо припустити, що за рахунок наступного.

Надмірне покладання на ШІ. Призвичаєння до поного покладання на штучний інтелект під час формулювання ідей або при виконанні завдань скоріш за все приведе до пригнічення власних творчих здібностей. Не буде потреби в критичному мисленні, пошуку оригінальних рішень, розвиненні власного бачення проблем тощо.

Втрата унікальності та оригінальності. В разі, коли велика кількість людей використовують ті самі моделі ШІ для рішення подібних задач, зникає оригінальність рішень, вони перестають бути унікальними та відображати особистість автора. Творчий процес вже не є персоналізований, а рішення неочікувані.

Обмеження мислення. Разом з втратою унікальності та оригінальності є небезпека впасти в шаблонність рішень, позбутися справжнього новаторства. Це витікає з обмеженої кількості алгоритмів, на яких побудовано різні моделі ШІ.

Зниження мотивації. Вже на сучасному рівні розвитку ШІ є дуже продуктивним та швидким. Складні і об'ємні завдання він може розв'язувати за лічені секунди, в той час, коли людина витратила би на це дні, тижні, місяці або роки. Може скластися враження, що людина не ефективна або малоефективна і малоцінна в порівнянні з ШІ. Вочевидь, що це демотивує.

Етичні та філософські питання. На цей день залишається відкритим питання про авторство творів, отриманих за участі або за допомогою ШІ. Дійсно, якщо в творчому процесі задіяно ШІ, чий насправді цей твір? Чи так цінна людина в процесі творчості?

На підставі наведеного вище можна ще раз наголосити, що ШІ слід сприймати лише як «інструмент», який слід використовувати належним чином. Тільки в цьому разі він буде ефективним. Він буде використаний як безвідмовний асистент, помічник, стимулятор натхнення. Його потенціал буде використаний для активізації творчих здібностей людини. В жодному разі не є припустимим заміна процесу мислення написанням промптів. Ще раз слід підкреслити, що людина має залишатися генератором ідей; роль ШІ має обмежуватися прискоренням рутинних етапів творчої праці. За словами Бена Шнайдермана, ми маємо створити

«людиноцентричне ШІ» [23]. Цю думку повністю підтримують автори дослідження [30].

Виходячи з такого збалансованого підходу, придивимось, яким чином можна використовувати ШІ при застосуванні деяких поширених методів активізації пошуку технічних рішень.

Метод проб та помилок. Якщо взяти під увагу той факт, що кінцевий результат використання цього методу залежить від кількості проведених дослідів [3, 4, 31], неважливо з позитивним чи негативним результатом, то застосування ШІ може скоротити цей показник. Одними з перших на майже безмежні можливості ШІ з цієї точки зору звернули увагу матеріалознавці [32-34 та ін.].

Автори досліджень [32, 33] бачать перспективу використання ШІ при розробці нових матеріалів в прогнозуванні їх властивостей, таких як температура плавлення, магнітні і електричні властивості, модуль Юнга тощо, за умови окреслення хімічного складу та структури. Для цього планується розробка низки спеціалізованих алгоритмів. Автори роботи [34] звертають увагу на можливості створення нанографітових конструкцій за допомогою ШІ при розробці нових радіопоглинаючих та радіовідбиваючих матеріалів.

Враховуючи збалансований підхід, на якому ми наголосили вище, до результатів використання штучного інтелекту у випадку використання метода проб і помилок, роздивимось, який вклад в разі його використання вносять «співавтори» – табл. 1.

Таблиця 1

Використання ШІ при реалізації метода проб і помилок *

Показник	Роль ШІ	Роль людини	Синергія
Швидкість** та масштаб	Може генерувати практично необмежену кількість «проб» за дуже стислий відрізок часу.	Витрачає зазвичай на це набагато більше часу та сил.	ШІ інтенсифікує процес, звільняє людину від монотонної творчої роботи, вивільняє час для творчої
Вартість помилок	Помилки ШІ (тобто незадовільні чи неякісні, невідповідні результати) самі по собі за рахунок віртуального характеру спроб практично безплатні. Вартість має тільки «машино-час»	Помилки у реальному світі при їх реалізації можуть привести до незворотних результатів, людських жертв та коштувати дуже дорого.	Після проведення «мислених» експериментів за допомогою ШІ можна відібрати найліпші варіанти та переходити до реальних, дорогих проб. Взагалі це зменшить ризики людських та матеріальних втрат.
Ітеративність та навчання	Кожен невдалий результат (помилка) дає людині цінну інформацію про те, що не працює, і як покращити запит (промпт) або критерії. Це процес генерації питань-відповідей, що не припиняється.	На основі цих помилок людина може уточнювати свої вимоги, краще формулювати ідеї та навчатися ефективнішій взаємодії з ШІ.	ШІ є чудовим інструментом для швидкої ітерації. Можна створювати, отримувати зворотний зв'язок (від ШІ або власну оцінку), змінювати, знову генерувати і так далі. Час досягнення бажаного результату суттєво зменшується.
Проведення аналізу отриманих результатів	Аналізує та досліджує дуже велику кількість вірогідних рішень, під час знаходження таких варіантів, до яких людина сама не дійшла би через специфіку процесу мислення або браку часу.	Може активно спостерігати за цим процесом, корегувати напрямки та вибирати найбільш вдалі результати.	За рахунок залучення ШІ діапазон можливих рішень суттєво збільшується, а людина виступає в ролі «провідника» та «критика».
Активізація творчих здібностей	Представляє на розсуд та оцінку людині безліч різноманітних варіантів. Це підштовхує людину для пошуку нових ідей на підставі отриманих від ШІ підказок, навіть якщо ці підказки самі по собі не є вдалими.	Вдосконалює свої можливості у формулюванні завдань та аналізі варіантів результату пошуку рішення.	ШІ пропонує, а людина аналізує та покращує. Це, так би мовити, взаємовигідний симбіоз.

*на підставі [32-34]

**згідно з відповіддю генеративної моделі ШІ Gemini на запитання від 04.09.25 «початкова реакція зазвичай становить частки секунди, а потім швидкість генерації тексту варіюється залежно від його довжини та складності, зазвичай у діапазоні десятків мілісекунд на токен»

З наведеної вище таблиці (див. табл. 1) видно, що метод проб і помилок є вельми ефективним розділом технічної творчості, де може існувати взаємодія людини та штучного інтелекту. Ця взаємодія дозволяє не тільки прискорити та здешевити процес. Суто з психологічної точки зору, це усуває у людини боязнь помилок, вимикає різні фобії, пов'язані з цим. Навпаки, невдачі стають цінним джерелом інформації та дозволяють корегувати напрямки пошуку рішення. Як раніше ми вже наголошували, провідна роль людини за підтримки ШІ дозволяє пришвидшити отримання бажаного результату. При цьому людина виступає в ролі керівника, який спрямовує ШІ в потрібному напрямку, за ШІ – роль підлеглого розумного співпрацівника.

Щодо асоціативних методів пошуку рішень, ШІ має величезний потенціал як помічник, але знову ж таки, не як повна заміна людського мозку. Це витікає з результатів досліджень [35, 36, 37]. Як ШІ може сприяти здійсненню асоціативних методів?

Наочним є приклад на підставі власних багаторічних спостережень. Під час практичного опанування теми «Асоціативні методи активізації творчої діяльності» дисципліни «Основи науково-технічної творчості» на підставі прикладу, що був наведений під час лекції, здобувачам рок від року пропонувалося одне й те саме завдання. Між двома абсолютно різними, непов'язаними поняттями (словами) треба було здійснити логічний зв'язок, встановити асоціативний перехід у чотири-п'ять етапів. Пропонувалося два різні поняття «деревина» і «м'яч». Приблизно за 10 хвилин здобувачі завжди з невеликими відхиленнями наводили такий ланцюжок асоціацій: «деревина» - «ліс», «ліс» - «поле», «поле» - «футбольне», «футбольний» - «м'яч». Ту ж саму задачу, за тих самих умов, 20.07.2025 року поставили перед генеративною моделлю ШІ Gemini. За декілька секунд було згенеровано приблизно пів сотні варіантів переходу. Найбільш логічними були:

1. **Деревина** → Дерев'яна палиця → Бейсбольна біта → Удар по М'ячу → **М'яч**
2. **Деревина** → Ліс → Дерева → Гумова смола (з деяких дерев) → Виробництво гуми → **М'яч** (гумовий)
3. **Деревина** → Дерев'яні іграшки → Дзига (обертасється) → Куля (форма) → **М'яч**
4. **Деревина** → Меблі → Стіл → Настільний теніс → Тенісна куля → **М'яч**
5. **Деревина** → Дерев'яний будинок → Хата → Дитяча гра на подвір'ї → Футбол → **М'яч**
6. **Деревина** → Олівець → Малювання → Коло → Сфера → **М'яч**
7. **Деревина** → Вогонь (дрова) → Тепло → Спорт на вулиці (в холодну пору) → Хокей → Шайба (М'яч для хокею) → **М'яч**
8. **Деревина** → Папір → Газета → Зім'ята газета → Куля з паперу → **М'яч** (імпровізований)
9. **Деревина** → Музичні інструменти (гітара) → Струни → Вібрація → Відскок → **М'яч**
10. **Деревина** → Паркет → Підлога → Стрибки → Відскок → **М'яч**

11. **Деревина** → Корабель → Море → Хвилі → Гра у воді → Водне поло → **М'яч**

12. **Деревина** → Скульптура → Форма → Коло → Сфера → **М'яч**

13. **Деревина** → Дерев'яна дошка → Рамка → Гра в дартс → Кулька дартса (спеціальний М'яч) → **М'яч**

14. **Деревина** → Пень → Сидіння → Поле для гри → Регбі → Регбійний М'яч → **М'яч**

15. **Деревина** → Вироби з дерева → Токарний верстат → Округлі форми → Кулясті предмети → **М'яч**

16. **Деревина** → Дерев'яний міст → Переправа → Змагання → Спорт → Футбол → **М'яч**

17. **Деревина** → Кора → Комахи (короїди) → Павутина (форма кола) → Кулька павутини → **М'яч**

18. **Деревина** → Дерев'яні намиста → Округлі елементи → Кулясті форми → **М'яч**

19. **Деревина** → Дерев'яна ложка → Їжа → Дитячі ігри → Кульки для гри → **М'яч**

20. **Деревина** → Дерев'яний кубик → Гральні кубики → Азартні ігри → Рулетка (кулька) → **М'яч**

А ось як впоралась того ж дня з цим завданням генеративна модель ШІ DeepSeek.

1. **Деревина** → дошка → стіл → теніс → **М'яч**

2. **Деревина** → папір → газета → футбол → **М'яч**

3. **Деревина** → гілка → птахи → гніздо → яйце → **М'яч**

4. **Деревина** → ліс → полювання → рушниця → куля → **М'яч**

5. **Деревина** → олівець → малювання → коло → **М'яч**

6. **Деревина** → паркет → спортзал → баскетбол → **М'яч**

7. **Деревина** → кора → корабель → регбі → **М'яч**

8. **Деревина** → дрова → вогонь → світло → лампа → абажур (округлий) → **М'яч**

9. **Деревина** → музичний інструмент → барабан → удар → **М'яч**

10. **Деревина** → палиця → гольф → **М'яч**

11. **Деревина** → ялинка → Новий рік → святкування → феєрверк (кульки) → **М'яч**

12. **Деревина** → будинок → діти → гра → **М'яч**

13. **Деревина** → пазли → гра → волейбол → **М'яч**

14. **Деревина** → ковзанка (льодова) → хокей → шайба (аналог М'яча) → **М'яч**

15. **Деревина** → ручка (від інструмента) → письмо → документ → офіс → стрес → **антистрес-М'яч**

16. **Деревина** → лави → парк → прогулянка → собака → **М'яч** (для гри)

17. **Деревина** → пальма → кокос → округлий об'єкт → **М'яч**

18. **Деревина** → лава → стадіон → футбол → **М'яч**

19. **Деревина** → іграшка (дерев'яна) → конячка → дитина → гра → **М'яч**

20. **Деревина** → палітурка (книги) → книга → фантастика → космос → планета (куля) → **М'яч**

Що ілюструє наведений приклад та що дає використання ІІІ в даному випадку? Які узагальнення можна на наш погляд при цьому зробити?

Перш за все – це створення віддалених асоціацій. Людський мозок має схильність формувати зв'язки, які є досить близькими до первинного поняття. ІІІ же може обробляти великі дані та знаходити незвичні зв'язки між, здавалося б, різними поняттями. Це дозволяє йому генерувати далекі асоціації. Це може, як нам здається, привести до нових оригінальних ідей, які людина сама не б придумала. Хоча не всі ці «машинні» асоціації, як ми бачили на прикладах вище, на 100 % логічні.

По-друге, і на це також звертають увагу автори [35, 36, 37], це – збільшення семантичних мереж. ІІІ може допомогти показати та збільшити змістові мережі навколо заданого поняття. Якщо дати ІІІ ключове слово, він зможе створити зв'язані слова, поняття, аналогії, протилежності та приклади їх використання в різних контекстах тощо.

По-третє, згідно з думкою авторів [35, 36, 37] – автоматичний аналіз та класифікація асоціацій. Коли згенеровано багато асоціацій (можливо, навіть за допомогою ІІІ), ІІІ може допомогти проаналізувати та класифікувати їх, відокремити ті, що не мають сенсу. З цим етапом, як ми бачимо на прикладі, генеративні моделі впорались по-різному. З людської точки зору перша група аналогій більш змістовна, ніж друга. Причина різниці, що спостерігаємо, скоріше за все, в різних алгоритмах, які було покладено в основу функціонування залучених до дослідження моделей ІІІ.

Четверте, що підкреслено в роботах [35, 36, 37], – це пошук аналогій та метафор. Сучасним версіям штучного інтелекту до снаги асоціативне мислення. А як відомо, створення метафор і аналогій базується саме на цих здібностях. Більш того, алгоритми ІІІ створені таким чином, що можливо провести аналогії між технічною проблемою та біологічним або природним явищем, історичною подією. Це дасть свіжий погляд на проблему, що потребує вирішення.

П'яте. Перетворення процесу рішення технічної проблеми на гру. Гейміфікація або ігрофікація як така визнана дієвим інструментом активізації творчих здібностей [38]. Вже створено ІІІ-інструменти (GPT моделі 3 та 4 - [35, 36, 37]), які дають можливість перетворити асоціативний пошук на гру. Для цього пропонується набір випадкових слів чи зображень, з якими необхідно асоціювати проблему, що вирішується. Процес стає більш цікавим, жвавим та плідним.

Але, на наш погляд, використання штучного інтелекту під час застосування асоціативних методів пошуку технічних рішень накладає і деякі обмеження. Вони перш за все пов'язані з особливостями роботи мозку людини, які не властиві ІІІ. Для людини притаманна інтуїція, людина має власний досвід, творчий процес має емоційне забарвлення, дуже часто в «гру» вступає підсвідомість [14-16]. В ніякий спосіб ІІІ цього відтворити не може. Саме це і надає

згенерованим людиною ідеям унікальність і глибину. Безперечно, ІІІ може запропонувати велику кількість нових комбінацій, але вони будуть як конструктор LEGO зібрані з однакових елементів, хоча в нових комбінаціях. ІІІ не в змозі сприйняти чи усвідомити довілля таким самим чином, як це робить людина. Тому і створити щось абсолютно нове йому не під силу без попереднього навчання на подібних даних. Так, ІІІ генерує асоціації, які є логічними на перший погляд, але фактично є позбавленими сенсу або абсолютно некоректними при вирішенні даної конкретної проблеми (як деякі варіанти з наших прикладів). Без критичної оцінки з боку людини тут не обійтися.

Ще одне. Ми маємо враховувати те, що при надмірному використанні ІІІ для генерації асоціацій у людини притуплюються власні когнітивні здібності, застосовані при асоціативному мисленні. Асоціативні здібності та вміння, як і будь-які інші, потребують тренінгу. Про це ми казали вже раніше.

Як і в попередній таблиці (див. табл.1), спробуємо з'ясувати «партнерські» стосунки людини і ІІІ при використанні асоціативних методів пошуку рішень – таблиця 2.

Таблиця 2
Взаємодія людини та ІІІ при реалізації асоціативних методів пошуку рішень*

Роль ІІІ	Роль людини
Прискорення процесу генерації ідей	Визначає, що саме потрібно асоціювати і з якою метою
Розширення діапазону можливих асоціацій, виводячи людину за рамки звичного мислення	Відбирає релевантні та цінні асоціації, відкидаючи «шум»
Виявлення прихованих зв'язків, які людина могла б не помітити	Надає сенс згенерованим асоціаціям, допрацьовує їх до реальних рішень
	Вносить свій унікальний досвід та розуміння людських потреб

*з урахуванням [35, 36, 37]

Як видно з наведеної таблиці, провідна та критична роль людини залишається незмінною. Тому і в цьому разі маємо використовувати ІІІ як дієвий акселератор для людських асоціативних процесів. За рахунок цього каталізатора людина може згенерувати більше ідей, краще дослідити зв'язки та знайти більш оригінальні рішення. Ці висновки не протирічать висновкам попереднього розділу і кореспондуються з поглядами авторів [35, 36, 37].

Мозковий штурм (МШ) [1, 3, 4, 8, 39], який часто називають мозковою атакою або, використовуючи англійську назву, брейнстормінгом, – один із найпопулярніших методів психологічної активізації колективної

творчої діяльності. Одними з перших ІІІ при проведенні сесії МШ використали Akata Z., Balliet D. та ін. [40]. Пізніше автори [41] спробували розібратися, чи може ІІІ повноцінно замінити процес МШ. Їх думка така: ІІІ не замінить мозковий штурм повністю, але може стати надзвичайно потужним інструментом для його посилення та доповнення. Воно базується на наступних аргументах, які як накладають обмеження на ІІІ в якості заміни МШ, так і підкреслюють сильні сторони використання ІІІ в якості «члена команди» МШ.

Обмеження ІІІ як заміни мозкового штурму полягають в наступному. Використання ІІІ в творчому процесі виключає «людський фактор», тобто емоційну складову цього процесу. Треба розуміти, що МШ не є лише генерацією ідей, це ще й безперервна взаємодія між людьми, для якої притаманні і міміка, і жести, і тон голосу, і емоційне забарвлення, на що наголошують автори [1, 3, 4, 8, 39]. Ці елементи – запорука створення довірливої атмосфери, взаємної симпатії та підтримки. Це іноді характеризують як виникнення «іскор» між учасниками. Природно, що ІІІ цього не може забезпечити.

Ще один чинник обмежень – відсутність контексту та людського досвіду. Не будемо заперечувати, що ІІІ може опрацьовувати величезні обсяги даних. Але при цьому в нього немає ані краплі власного життєвого досвіду, відсутня інтуїція, він не має поняття про етичний контекст; «читати між рядками» ІІІ також не здатен. В результаті цього штучний інтелект може запропонувати рішення, які на перший погляд є адекватними поставленому завданню, але вони можуть бути незручними з точки зору людського досвіду або протирічити нормам моралі, чи зовсім можуть бути некорисними для людей. Характерним є те, що цікаві ідеї часто-густо виникають «з нізвідки», у вигляді спонтанних асоціацій, жартів, неофіційних теревенек, які неможливо вмістити в жорсткі рамки алгоритму. Ми вже казали, що засади роботи людського мозку інші, ніж жорсткі алгоритми. Мозок людини здатен на неочікувані «стрибки» мислення, як вважають психологи [14-16]. На кінцевому етапі, коли настає час фізичної реалізації ідей, суттєвим є почуття колективної відповідальності за результат серед членів команди, які брали участь у МШ. Це сприяє успішному втіленню проєктів. ІІІ не може нести відповідальність чи формувати довіру. У мозковому штурмі кожен учасник вносить свій внесок, і відчуття приналежності до ідеї є мотивуючим фактором. Якщо ідеї генерує ІІІ, це може зменшити особисту залученість та мотивацію команди. Само цей факт встановили автори дослідження [40] на підставі експериментів, до яких залучали студентів тайських університетів.

А яким чином ІІІ може посилити мозковий штурм? ІІІ може швидко надати велику кількість вихідних ідей або варіантів за лічені секунди. Наприклад, автори [42] на підставі власних експериментів показують, що в «гібридних» групах показник кількості ідей

за час сесії МШ на одну особу становить 10,13. В цей час для «людської» групи він лише 7,83. Отже, включення штучного інтелекту до групи МШ дає можливість створити плідне підґрунтя для подальшого обговорення. Це дає можливість людській частині групи мозкового штурму більше уваги та часу приділити доопрацюванню ідей, їх критиці та виділенню більш перспективних з них. У випадку, якщо команда так би мовити «буксує» і не може придумати нових ідей, ІІІ може підштовхнути її – запропонувати свіжий погляд або несподівані асоціації, які допоможуть розблокувати мислення. З цієї точки зору буде корисне те, що ІІІ швидко аналізує великі об'єми інформації, відшукує нові напрямки, вказує на недоліки в існуючих рішеннях або несприятливі фактори, які слід врахувати під час МШ. Після мозкового штурму ІІІ може виступити в якості секретаря. Він може допомогти згрупувати схожі ідеї, виявити основні теми та структурувати отриману інформацію. Вочевидь це значно спростить подальшу роботу, пов'язану з реалізацією знайдених рішень.

Корисним також є те, що ІІІ є поліглотом та має доступ до інформації на різних мовах та з різних галузей. За рахунок цього він генеруватиме ідеї, які виходять за рамки вузького мислення групи фахівців певної області знань, пропонуватиме неочікувані зв'язки чи нові точки зору, спираючись на дані з різних галузей по всьому світу. На відміну від людей, ІІІ не має особистих упереджень чи тиску з боку суспільства. І це дозволяє йому генерувати ідеї без страху негативного їх сприйняття. Це може бути плідно використано на першому етапі МШ під час генерування максимальної кількості різноманітних варіантів.

Таким чином, ми знову доходимо висновку про те, що не слід замінювати людський мозковий штурм на використання ІІІ. Штучний інтелект краще використовувати як «співавтора» або «помічника». Оптимальний сценарій, як ми бачимо, – це гібридний мозковий штурм. ІІІ «видає на гора» велику кількість первинних ідей, допоміжної інформації та аналізує їх. Люди (команда МШ) використовують ці ідеї як відправну точку. До цих ідей додається власний досвід, інтуїція, критичне мислення, емоційна складова, креативність та здатність до нестандартного мислення. Така спільна робота дозволяє досягти симбіозу, де сильні сторони ІІІ (швидкість обробки даних, відсутність упереджень) доповнюються унікальними здібностями людини (креативність, інтуїція, емпатія, здатність до контекстного мислення тощо).

Висновки

На підставі багатостороннього аналізу наслідків широкого залучення штучного інтелекту до творчого процесу в науково-технічній галузі можна зробити наступні висновки.

1. Під впливом ІІІ в деяких випадках творчі здібності людини можуть активізуватися, а в деяких – пригнічуватися.

2. Використання ІІІ при активізації процесів пошуку рішень в сфері науки і техніки (метод проб і помилок, асоціативні методи, метод мозкового штурму тощо) не замінює їх, а робить більш ефективними, продуктивними та інноваційними.

Перелік використаних джерел

- [1] Altshuller G.S. Creativity as an Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems. New York, NY : CRC Press, 1984. 320 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781466593442>.
- [2] Крупа В. В. Теорія технічних систем: особливості побудови створення та розвитку : навчальний посібник. Тернопіль : Осадця Ю. В., 2023. 308 с.
- [3] Загорецька О. С., Загорецька Г. С. Основи науково-технічної творчості. Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2018. 210 с.
- [4] Зянько В. В., Лазарева Т. А. Основи науково-технічної творчості та патентознавство : навч. посіб. Харків : Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2014. 180 с.
- [5] Ulrich K. T., Eppinger S. D. Product Design and Development. 8th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2024. 350 p. DOI: <https://doi.org/10.1036/9781264426540>.
- [6] Dym C. L., Little P., Orwin E. Engineering Design: A Project-Based Introduction. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2014. 400 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118944510>.
- [7] Kwatra S., Salamatov Y. Laws of Technical Systems' Evolution. *Trimming, Miniaturization and Ideality via Convolution Technique of TRIZ*. India : Springer, 2013. Pp. 1-22. DOI: https://doi.org/10.1007/978-81-322-0737-5_1.
- [8] Altshuller G. The Innovation Algorithm: TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity. Worcester : Technical Innovation Center, Inc., 1999. 280 p.
- [9] Pandey A., Panday P., Joshi B. Design and development of applications using human-computer interaction. *Innovations in Artificial Intelligence and Human-Computer Interaction in the Digital Era*. Academic Press, 2023. Pp. 255-293. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99891-8.00011-5>.
- [10] Human and artificial cognition / G. Siemens et al. Computers and Education: Artificial Intelligence. 2022. Vol. 3. Article 100107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100107>.
- [11] Альтшуллер Г. С. Знайти ідею: Вступ до ТРІЗ – теорії розв'язання винахідницьких задач. Київ : Баланс Бізнес Букс, 2007. 220 с.
- [12] Osborn A. F. Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Problem Solving. 1st ed. Oxford, England : Charles Scribner's Sons, 1953. 317 p.
- [13] Creativity: An Individual or Collective Phenomenon? A Historical-Psychological Perspective / Barón-Birchénall L., Sánchez-Vallejo A., Toro-Silva C., Folleco-Eraso A. *Adaptive Behavior*. 2025. Vol. 33, Iss. 4. Pp. 249-269. DOI: <https://doi.org/10.1177/10597123251343849>.
- [14] Сова М. О., Деніжна С. О., Петухова І. О. Психологія творчості : навчальний посібник. Ірпінь : Державний податковий університет, 2022. 392 с.
- [15] Яланська С. П. Психологія творчості : навч. посіб. 2-е вид., випр., допов. Полтава : Сімон, 2018. 182 с.
- [16] Ярошенко І. В. До питання розвитку творчих здібностей особистості. *Психологічні проблеми творчості* : матеріали XXIV Міжнар. наук. психол. конф., м. Київ, 24 червня 2024 р. / за ред. В. О. Моляко. Київ : Ін-т психології ім. Г. С. Костюка НАПН України, 2024. С. 228-233.
- [17] Boden M. A. The Creative Mind: Myths and Mechanisms. Routledge, 2004. 360 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203508527>.
- [18] Hybrid collective intelligence in a human-AI society / M. M. M. Peeters et al. *AI & Society*. 2021. Vol. 36, № 1. Pp. 217-238. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00146-020-01005-y>.
- [19] Toner-Rodgers A. Artificial Intelligence, Scientific Discovery, and Product Innovation. arXiv pre-print. 2024. arXiv:2412.17866. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.17866>.
- [20] Haase C., Sio U. N., Lortie-Forgues H. Human-AI Co-Creativity: Exploring Synergies Across Levels of Creative Collaboration. arXiv pre-print. 2024. arXiv:2411.12527. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.12527>.
- [21] Anthony C., Bechky B. A., Fayard A.-L. "Collaborating" with AI: Taking a system view to explore the future of work. *Organization Science*. 2023. Vol. 34, № 5. Pp. 1672-1694. DOI: <https://doi.org/10.1287/orsc.2022.1651>.
- [22] Agent Laboratory: Using LLM Agents as Research Assistants / S. Schmidgall et al. arXiv pre-print. 2025. arXiv: 2501.04227. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.04227>.
- [23] Shneiderman B. Human-Centered AI. Oxford University Press, 2020. 400 p. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780192845290.001.0001>.
- [24] Russel S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4th ed. Pearson, 2021. 1115 p.
- [25] Aydoğan S. Negative Effects of Artificial Intelligence On Human Creativity Ability. *Consumer, Marketing, AI: Dark Sides and Ethics*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub710.c3033>.
- [26] AI vs Human Creativity: Are Machines Generating Better Ideas? / Naveed F., Khan I. A., Murtaza R. M., Subhani A. *Technium Romanian Journal of Applied*

- Sciences and Technology. 2025. Vol. 30. Pp. 117-128. DOI: <https://doi.org/10.47577/technium.v30i.13023>.
- [27] Zhai C., Wibowo S., Li L. D. The effects of over-reliance on AI dialogue systems on students' cognitive abilities: a systematic review. *Smart Learning Environment*. 2024. Vol. 11. Article 28. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40561-024-00316-7>.
- [28] Gerlich M. AI Tools in Society: Impacts on Cognitive Offloading and the Future of Critical Thinking. *Societies*. 2025. Vol. 15, iss. 1. Article 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/soc15010006>.
- [29] Wade M. Is AI a Threat to Human Creativity? URL: <https://www.oxford-aiethics.ox.ac.uk/ai-threat-human-creativity> (дата звернення: 21.07.2025).
- [30] Shaw P., Devgun P. AI in Content Creation. *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*. 2025. Vol. 7, iss. 3. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i03.45053>.
- [31] Whimbey A., Lochhead J., Narode R. Problem Solving & Comprehension. New York : Psychology Press, 2013. 440 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203130810>.
- [32] Zuccarini C., Ramachandran K., Jayaseelan D. D. Material discovery and modeling acceleration via machine learning. *APL Materials*. 2024. Vol. 12, iss. 9. Article 090601. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0230677>.
- [33] AI methods in materials design, discovery and manufacturing: A review / Papadimitriou I., Gialampoukidis I., Vrochidis S., Kompatsiaris I. *Computational Materials Science*. 2024. Vol. 235. Article 112793. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2024.112793>.
- [34] Estevez D., Qin F. High-performance carbonaceous absorbers: From heterogeneous absorbents to data-driven metamaterials. *Carbon*. 2025. Vol. 233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119850>.
- [35] Grilli L., Pedota M. Creativity and artificial intelligence: A multilevel perspective. *Creativity and Innovation Management*. 2024. Vol. 33, iss. 2. Pp. 234-247. DOI: <https://doi.org/10.1111/caim.12580>.
- [36] Ivcevic Z., Grandinetti M. Artificial intelligence as a tool for creativity. *Journal of Creativity*. 2024. Vol. 34, iss. 2. Article 100079. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yjoc.2024.100079>.
- [37] Beaty R. E., Kenett Y. N. Associative thinking at the core of creativity. *Trends in Cognitive Sciences*. 2023. Vol. 27, iss. 7. Pp. 671-683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.04.004>.
- [38] Kapp K. M. The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education. San Francisco, CA : Pfeiffer, 2012. 268 p.
- [39] Козинець І. І. Мозковий штурм як одна з форм колективного обговорення проблем. *Наукові записки Бердянського державного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки*. 2015. Вип. 1. С. 99-103.
- [40] A Research Agenda for Hybrid Intelligence: Augmenting Human Intellect With Collaborative, Adaptive, Responsible, and Explainable Artificial Intelligence / Z. Akata et al. *Computer*. 2020. Vol. 53, iss. 8. Pp. 18-28. DOI: <https://doi.org/10.1109/MC.2020.2996587>.
- [41] Karanjakwut C., Charunsri K. Transforming AI chatbots for a brainstorming teaching technique of process writing. *Malaysian Online Journal of Educational Technology*. 2025. Vol. 13, iss. 1. Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.52380/mojet.2025.13.1.559>.
- [42] Memmert L., Bittner E. Human-AI Collaboration for Brainstorming: Effect of the Presence of AI Ideas on Breadth of Exploration. *Proceedings of the 57th Hawaii International Conference on System Sciences*, Honolulu, Hawaii, USA, 3-6 January 2024. Pp. 421-430. DOI: <https://doi.org/10.24251/HICSS.2024.050>.

A LOOK AT VARIOUS ASPECTS OF USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN TECHNICAL CREATIVITY

Dan L.O.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1954-4871>, e-mail: danleonid.alex@gmail.com;

Trofimova L.O.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4576-2589>, e-mail: trofimova.pstu@gmail.com

The successful application of techniques and methods of technical creativity has always been based on the consideration of modern trends in science, technology, and production. Recently, the use of artificial intelligence has become widespread. Technical creativity, which has long been the prerogative of humans, has also been influenced by this trend. This article is aimed at analyzing the positive and negative aspects of human and artificial intelligence interaction in the process of solving various technical problems. First, the author discusses the general principles and possible consequences of human-AI cooperation in science and technology. The author is convinced that humans should play a leading

role in this interaction, and artificial intelligence should be only a tool, albeit a very effective and useful one. At the same time, the author highlights the pitfalls of involving artificial intelligence in the creative process in the field of activity under analysis. Further, using examples of the use of artificial intelligence in the implementation of the most common techniques for finding technical solutions, such as trial and error, associative methods, and brainstorming, the authors specify the positive and negative consequences of this use. In addition to analyzing literary sources, the authors present the results of their own experience using artificial intelligence in teaching the discipline "Fundamentals of Scientific and Technical Creativity". At the end of the analysis, the authors summarize their thoughts on the issue and conclude, the main of which is that AI cannot fully replace humans in the field of technical creativity. The best result can be obtained by a harmonious combination of human and artificial intelligence capabilities.

Keywords: technical creativity, artificial intelligence, trial and error, analogy, brainstorming.

References

- [1] G. Altshuller, *Creativity as an Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems*. New York, NY, USA: CRC Press Publ., 1984. doi: **10.1201/9781466593442**.
- [2] V.V. Krupa, *Teoriia tekhnichnykh system: osoblyvosti pobudovy stvorennia ta rozvytku: navchalnyi posibnyk* [Theory of technical systems: features of construction, creation and development: textbook]. Ternopil, Ukraine: Osadtsa Yu.V. Publ, 2023. (Ukr.)
- [3] O.S. Zahoretska, and H.S. Zahoretska, *Osnovy naukovy-tekhnichnoi tvorchosti* [Fundamentals of scientific and technical creativity]. Kyiv, Ukraine: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Publ., 2018. (Ukr.)
- [4] V.V. Zianko, and T.A. Lazareva, *Osnovy naukovy-tekhnichnoi tvorchosti ta patento-znavstvo : navch. posib.* [Fundamentals of scientific and technical creativity and patent science: textbook]. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv National Automobile and Road University Publ., 2014. (Ukr.)
- [5] K.T. Ulrich, and S.D. Eppinger, *Product Design and Development*, 8th ed. New York, USA: McGraw-Hill Education Publ., 2024. doi: **10.1036/9781264426540**.
- [6] C.L. Dym, P. Little, and E. Orwin, *Engineering Design: A Project-Based Introduction*, 4th ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Publ., 2014. doi: **10.1002/9781118944510**.
- [7] S. Kwatra, and Y. Salamatov, "Laws of Technical Systems' Evolution," in *Trimming, Miniaturization and Ideality via Convolution Technique of TRIZ*. India: Springer, 2013, pp. 1-22. doi: **10.1007/978-81-322-0737-5_1**.
- [8] G. Altshuller, *The Innovation Algorithm: TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity*. Worcester, UK: Technical Innovation Center, Inc. Publ., 1999.
- [9] A. Pandey, P. Panday, and B. Joshi, "Design and development of applications using human-computer interaction," in *Innovations in Artificial Intelligence and Human-Computer Interaction in the Digital Era*. Academic Press, 2023, pp. 255-293. doi: **10.1016/B978-0-323-99891-8.00011-5**.
- [10] G. Siemens et al., "Human and artificial cognition," *Computers and Education: Artificial Intelligence*, vol. 3, article 100107, 2022. doi: **10.1016/j.caeai.2022.100107**.
- [11] H.S. Altshuller, *Znaity ideiu: Vstup do TRVZ – teorii rozviazannia vynakhidnytskykh zadach* [Find an Idea: Introduction to TRVZ – Theory of Inventive Problem Solving]. Kyiv, Ukraine: Balans Biznes Buks Publ., 2007. (Ukr.)
- [12] A.F. Osborn, *Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Problem Solving*, 1st ed. Oxford, England: Charles Scribner's Sons Publ., 1953.
- [13] L. Barón-Birchenall, A. Sánchez-Vallejo, C. Toro-Silva, and A. Folleco-Eraso, "Creativity: An Individual or Collective Phenomenon? A Historical-Psychological Perspective," *Adaptive Behavior*, vol. 33, iss. 4, pp. 249-269, 2025. doi: **10.1177/10597123251343849**.
- [14] M.O. Sova, S.O. Dienizhna, and I.O. Pietukhova, *Psykhohihiia tvorchosti: navchalnyi posibnyk* [Psychology of creativity: a textbook]. Irpin, Ukraine: State Tax University Publ., 2022. (Ukr.)
- [15] S.P. Ialanska, *Psykhohihiia tvorchosti : navch. posib.* [Psychology of creativity: a textbook], 2nd ed. Poltava, Ukraine: Simon Publ., 2018. (Ukr.)
- [16] I.V. Iaroshenko, "Do pytannia rozvytku tvorchykh zdibnostei osobystosti" ["On the issue of developing the creative abilities of the individual"], in *Proc. of the XXIV Int. sci. psych. conf. «Psychological problems of creativity»*, Kyiv, Ukraine, June 24, 2024, pp. 228-233. (Ukr.)
- [17] M.A. Boden, *The Creative Mind: Myths and Mechanisms*. Routledge Publ., 2004. doi: **10.4324/9780203508527**.
- [18] M.M.M. Peeters, et al., "Hybrid collective intelligence in a human-AI society," *AI & Society*, vol. 36, № 1, pp. 217-238, 2021. doi: **10.1007/s00146-020-01005-y**.
- [19] A. Toner-Rodgers, "Artificial Intelligence, Scientific Discovery, and Product Innovation," 2024, *arXiv:2412.17866*. doi: **10.48550/arXiv.2412.17866**.
- [20] C. Haase, U.N. Sio, and H. Lortie-Forgues, "Human-AI Co-Creativity: Exploring Synergies Across Levels of Creative Collaboration," 2024, *arXiv:2411.12527*. doi: **10.48550/arXiv.2411.12527**.
- [21] C. Anthony, B.A. Bechky, and A.-L. Fayard, "Collaborating" with AI: Taking a system view to explore the future of work," *Organization Science*, vol. 34, № 5, pp. 1672-1694, 2023. doi: **10.1287/orsc.2022.1651**.

- [22] S. Schmidgall, et al., “Agent Laboratory: Using LLM Agents as Research Assistants,” 2025, *arXiv: 2501.04227*. doi: **10.48550/arXiv.2501.04227**.
- [23] B. Shneiderman, *Human-Centered AI*. Oxford, UK: Oxford University Press Publ., 2020. doi: **10.1093/oso/9780192845290.001.0001**.
- [24] S.J. Russel, and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4th ed. Pearson Publ., 2021.
- [25] S. Aydoğan, “Negative Effects of Artificial Intelligence On Human Creativity Ability,” *Consumer, Marketing, AI: Dark Sides and Ethics*. 2025. doi: **10.58830/ozgur.pub710.c3033**.
- [26] F. Naveed, I.A. Khan, R.M. Murtaza, and A. Subhani, “AI vs Human Creativity: Are Machines Generating Better Ideas?,” *Technium Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, vol. 30, pp. 117-128, 2025. doi: **10.47577/technium.v30i.13023**.
- [27] C. Zhai, S. Wibowo, and L.D. Li, “The effects of overreliance on AI dialogue systems on students' cognitive abilities: a systematic review,” *Smart Learning Environment*, vol. 11, article 28, 2024. doi: **10.1186/s40561-024-00316-7**.
- [28] M. Gerlich, “AI Tools in Society: Impacts on Cognitive Offloading and the Future of Critical Thinking,” *Societies*, vol. 15, iss. 1, article 6, 2025. doi: **10.3390/soc15010006**.
- [29] M. Wade, Is AI a Threat to Human Creativity? [Online]. Available: <https://www.oxford-aiethics.ox.ac.uk/ai-threat-human-creativity>. Accessed on: July 21, 2025.
- [30] P. Shaw, and P. Devgun, “AI in Content Creation,” *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*, vol. 7, iss. 3, pp. 1-9, 2025. doi: **10.36948/ijfmr.2025.v07i03.45053**.
- [31] A. Whimbey, J. Lochhead, and R. Narode, *Problem Solving & Comprehension*. New York, USA: Psychology Press Publ., 2013. doi: **10.4324/9780203130810**.
- [32] C. Zuccarini, K. Ramachandran, and D.D. Jayaseelan, “Material discovery and modeling acceleration via machine learning,” *APL Materials*, vol. 12, iss. 9, article 090601, 2024. doi: **10.1063/5.0230677**.
- [33] I. Papadimitriou, I. Gialampoukidis, S. Vrochidis, and I. Kompatsiaris, “AI methods in materials design, discovery and manufacturing: A review,” *Computational Materials Science*, vol. 235, article 112793, 2024. doi: **10.1016/j.commatsci.2024.112793**.
- [34] D. Estevez, and F. Qin, “High-performance carbonaceous absorbers: From heterogeneous absorbents to data-driven metamaterials,” *Carbon*, vol. 233, 2025. doi: **10.1016/j.carbon.2024.119850**.
- [35] L. Grilli, and M. Pedota, “Creativity and artificial intelligence: A multilevel perspective,” *Creativity and Innovation Management*, vol. 33, iss. 2, pp. 234-247, 2024. doi: **10.1111/caim.12580**.
- [36] Z. Ivcevic, and M. Grandinetti, “Artificial intelligence as a tool for creativity,” *Journal of Creativity*, vol. 34, iss. 2, article 100079, 2024. doi: **10.1016/j.joc.2024.100079**.
- [37] R.E. Beaty, and Y.N. Kenett, “Associative thinking at the core of creativity,” *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 27, iss. 7, pp. 671-683, 2023. doi: **10.1016/j.tics.2023.04.004**.
- [38] K.M. Kapp, *The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education*. San Francisco, CA, USA: Pfeiffer Publ., 2012.
- [39] I.I. Kozynets, “Mozkovyi shturm yak odna z form kolektyvnoho obhovorennia problem” [“Brainstorming as a form of collective discussion of problems”], *Naukovi zapysky Berdianskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu. Seriya: Pedahohichni nauky – Scientific papers of Berdyansk State Pedagogical University Series: Pedagogical sciences*, vol. 1, pp. 99-103, 2015. (Ukr.)
- [40] Z. Akata et al., “A Research Agenda for Hybrid Intelligence: Augmenting Human Intellect With Collaborative, Adaptive, Responsible, and Explainable Artificial Intelligence,” *Computer*, vol. 53, iss. 8, pp. 18-28, 2020. doi: **10.1109/MC.2020.2996587**.
- [41] C. Karanjakwut, and K. Charunsri, “Transforming AI chatbots for a brainstorming teaching technique of process writing,” *Malaysian Online Journal of Educational Technology*, vol. 13, iss. 1, pp. 1-18, 2025. doi: **10.52380/mojet.2025.13.1.559**.
- [42] L. Memmert, and E. Bittner, “Human-AI Collaboration for Brainstorming: Effect of the Presence of AI Ideas on Breadth of Exploration,” in *Proceedings of the 57th Hawaii International Conference on System Sciences*, Honolulu, Hawaii, USA, January 3-6, 2024, pp. 421-430. doi: **10.24251/HICSS.2024.050**.

Стаття надійшла 30.09.2025

Стаття прийнята 14.10.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Дан Л. О., Трофімова Л. О. Погляд на різні аспекти використання штучного інтелекту в технічній творчості. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 40-49. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344599>.

ГРАФОВІ НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ ТА АЛГОРИТМИ PAGERANK
У ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПУЛЯРНОСТІ ХЕШТЕГІВ У СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Левицька Т.О.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»,
м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3359-1313>, e-mail:
levitskaya_t_a@pstu.edu;

Котихова Л.Д.

асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5008-622X>, e-mail: kotikhova_l_d@pstu.edu

У статті було досліджено сучасні графові нейронні мережі (GNN, Graph Neural Networks) та алгоритми PageRank як інструменти для вирішення задачі передбачення популярності хештегів у соціальних мережах. Розглянуто можливості й особливості їх застосування. В рамках дослідження було проаналізовано наявні методи та підходи для вирішення цієї задачі й виявлено можливість їх вдосконалення. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням обсягів інформації в соціальних мережах та необхідністю ефективного аналізу її поширення. Також було розглянуто поняття хештегів та їх структурні особливості й поведінку в соціальних медіа, представлено модель прогнозування їх популярності в соціальних мережах на основі графових нейронних мереж та алгоритмів PageRank. Проведено аналіз сучасних архітектур GNN, розглянуто етапи та особливості їх роботи. А також було розглянуто модифікації PageRank, зокрема Time-constrained Personalized PageRank. При порівнянні з іншими моделями для вирішення аналогічних завдань було виділено переваги та недоліки пропонованої моделі з використанням графових нейронних мереж в комбінації з алгоритмом PageRank. Перевагою представленої моделі прогнозування є зокрема те, що вона допоможе також врахувати вплив користувачів та їх роль в популяризації контенту, що дозволяє краще зрозуміти динаміку розповсюдження інформації у соціальних мережах. Крім цього наведено результати дослідження, які підтверджують ефективність комбінованого підходу в порівнянні з класичними алгоритмами машинного навчання. Також в дослідженні було виявлено сильні та слабкі сторони пропонованої моделі й наведено практичні рекомендації для використання. Отримані результати можуть бути корисними, наприклад, для вирішення задач контентного аналізу, таргетованої реклами та управління інформаційними потоками в соціальних медіа.

Ключові слова: соціальні мережі, прогнозування, хештег, графові нейронні мережі, PageRank.

Постановка проблеми

Аналіз соціальних мереж – це комплексна галузь, що поєднує в собі знання з соціології, мережевого аналізу, теорії графів, штучного інтелекту, інформаційного пошуку та маркетингу. В його основі лежить вирішення задач, пов'язаних зі структурами, які можна описати за допомогою графів – моделей, що допомагають досліджувати взаємозв'язки між елементами.

Поєднання цих знань разом з сучасними методами аналізу та візуалізації становить основу соціального аналізу, дозволяючи вивчати суспільство через мережеві зв'язки між різними людьми [1].

Разом зі зростаючим інтересом до аналізу соціальних мереж можемо спостерігати і розширення доступу до мережевих даних. Це в свою чергу сприяє тому, що з'являються нові методи аналізу і глибшого їх розуміння. До того ж, результати аналізу соціальних мереж застосовують у різних галузях. Зокрема, особливо важливими вони є в сучасній соціології, економіці, антропології, біології, демографії, комунікації, географії, історії, інформатиці, організаційних дослідженнях, політології, медицині, соціальній психології, лінгвістиці та інших галузях.

База такого аналізу соціальних медіа – зв'язки різного виду (родинні, бізнесові, політичні тощо). Це дозволяє оцінити структури мережі та її внутрішню динаміку. Такі структури можуть як сприяти

економічному розвитку, так і мати загрози. Наприклад, поширення епідемій або фінансових криз через щільні зв'язки між ключовими суб'єктами.

Одне з найважливіших завдань під час аналізу соціальних мереж – прогнозування популярності хештегів та трендів. Хештеги – це багатофункціональні елементи, які передають різноманітні міжособистісні значення в соціальних медіа. Наприклад, допомагають групувати пости у соціальних мережах за певною тематикою. Додавання хештегів до постів стало результатом лінгвістичних інновацій.

Структура хештега впливає на його сприйняття. Особливістю хештегів є те, що вони утворені злиттям слів. А це потребує від читача уваги та концентрації. Тому ефективніше використовувати односкладові хештеги. Вони лаконічні, динамічні й краще впливають на аудиторію.

На думку дослідників, функції хештегів відповідають трьом основним функціям мови, визначеним М. Галлідеєм [2]:

– Концептуальна – передача досвіду мовця про внутрішній і зовнішній світ.

– Міжособистісна – встановлення та підтримка соціальних стосунків, вплив на співрозмовника.

– Текстова – створення зв'язного висловлювання.

Таким чином, при постійному розвитку соціальних мереж та зростанні обсягів інформації

надзвичайно актуальним лишається питання передбачення популярності трендів чи хештегів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Прогнозування та передбачення загалом відіграє важливу роль в багатьох сферах людської діяльності. Цьому питанню присвячено багато досліджень. Особливо в роботі [3] автори акцентують увагу на важливості застосування наукового підходу для керування соціально-економічними процесами. Автори розглядають побудову моделі для прогнозування популярності публікацій в соціальних мережах. Для цього вони використовують динамічну рекурентну нейронну мережу.

Також в роботі [4] акцентується увага на впливовості та можливостях використання соціальних мереж. Наприклад, розглянуто їх як засіб для громадської самоорганізації.

В роботі [5] автор відзначає, що хоч дослідження Інтернету та соціальних медіа в Україні розпочалося не так давно, але актуальність їх вивчення зростає з кожним днем. В зв'язку з цим автор розглядає різноманітні методи для аналізу даних соціальних медіа в залежності від їх типу.

Також науковці приділяли увагу й дослідженню саме ролі хештегів. Наприклад, в роботі [6] було проведено статистичний аналіз хештегів та розглянуто стилістичні, синтаксичні та статистичні особливості хештегів.

Проаналізовані дослідження приділяли значну увагу ролі користувача в соціальній мережі та його/її впливу на інших користувачів. У сучасній літературі бракує підходів, які б були спрямовані на ідентифікацію впливових користувачів у соціальних мережах. Також недостатньо уваги приділено аналізу рейтингу користувачів щодо їх взаємодії з поширеним контентом.

Мета статті

Метою статті є дослідження можливостей застосування моделей графових нейронних мереж та алгоритмів PageRank для передбачення можливої популярності хештегів в соціальних мережах. Об'єкт дослідження – соціальні мережі, представлені у вигляді графових структур. Предметом дослідження є методи та моделі прогнозування популярності хештегів в соціальних мережах.

Виклад основного матеріалу

Протягом останніх десятиліть дослідники створюють та вдосконалюють різноманітні нейронні мережі для роботи з графовими даними – так звані графові нейронні мережі (Graph Neural Networks, GNN). Наявні досягнення в цій галузі значно підвищили їхню ефективність та здатність до моделювання складних взаємозв'язків.

Сьогодні GNN знаходять практичне застосування у різних сферах, зокрема:

- відкриття нових антибактеріальних засобів;
- моделювання фізичних процесів;
- виявлення фейкових новин;
- прогнозування дорожнього трафіку;
- створення рекомендаційних систем.

Наведені можливі варіанти використання графових нейронних мереж демонструють потужність графових структур у моделюванні складних систем. Також вони відкривають нові можливості для інтеграції GNN в реальні проєкти.

Наприклад, застосування графових нейронних мереж для прогнозування популярності тем і хештегів у соціальних мережах є новим підходом, що надає можливості для моделювання складних взаємодій між користувачами та контентом на графах. Використання GNN дозволяє ефективно виявляти наявні приховані структури та залежності в даних.

Завдяки графовим нейронним мережам можливе більш глибоке розуміння складних взаємодій у соціальних мережах. Вони дозволяють враховувати структуру графа та його атрибути. І це дає більшу точність у порівнянні з традиційними методами. GNN моделюють нелінійні залежності між вузлами і здатні враховувати динаміку змін у мережах. Завдяки цьому вони більш ефективні при прогнозуванні популярності тем і хештегів.

Дослідження свідчать про ефективність GNN: ці моделі забезпечують вищу точність передбачень популярності контенту порівняно з іншими підходами, такими як SVM або Random Forest. Наприклад, GNN демонструють покращену продуктивність при врахуванні динаміки взаємодій між користувачами та контентом для моделювання соціальних графів. В той же час, PageRank добре працює на статичних графах, але його точність нижча в динамічних середовищах. Варто зазначити, що GNN забезпечує високу точність і ефективність у динамічних та складних графових структурах, але водночас вимагає більше обчислювальних ресурсів.

Для підвищення ефективності пропонується застосувати комбінований метод. Комбінація PageRank з GNN дозволяє скористатися сильними сторонами обох підходів: PageRank надає надійний спосіб оцінки важливості вузлів, а GNN враховує складні взаємодії і динамічні зміни у мережі. Це забезпечує більш точні та ефективні результати в порівнянні з використанням кожного методу окремо.

Комбінація PageRank і GNN покращує загальну продуктивність і точність прогнозів, враховуючи як структуру мережі, так і динаміку змін.

Графові нейронні мережі є сучасним підходом до аналізу даних, представлених у вигляді графів. Вони поєднують можливості традиційних нейронних мереж з гнучкістю роботи з графовими структурами, що

дозволяє враховувати як властивості окремих вузлів і ребер, так і структуру графа в цілому.

Графи також можна зустріти й в повсякденному житті. Об'єкти реального світу часто визначаються через їхні взаємозв'язки з іншими. Тому набір таких об'єктів та зв'язків між ними природно моделюється у формі графа.

При використанні графових структур для аналізу соціальних зв'язків графи взаємодій моделюють соціальні зв'язки як набір вузлів (користувачів) і ребер (взаємодій між ними). Основні принципи побудови таких графів включають:

- Вузли (Nodes), які представляють елементи соціальної мережі, такі як окремі користувачі мережі та сторінки. Вузли можуть мати атрибути, такі як ім'я, кількість підписників, активність тощо.

- Ребра (Edges), що відображають взаємодії між різними вузлами, такими як підписки, лайки, коментарі або повідомлення. Ребра можуть бути спрямованими (наприклад, підписка одного користувача на іншого) або не спрямованими (взаємна дружба).

- Ваги ребер (Edge Weights): ребра можуть бути зваженими, де вага відображає інтенсивність або частоту взаємодії (наприклад, кількість повідомлень між певними користувачами).

Виділяють такі типи графів:

- Однорівневі графи: всі вузли мають однаковий тип (наприклад, тільки користувачі).

- Багаторівневі графи: включають вузли різних типів (наприклад, користувачі та публікації).

Основна концепція GNN полягає в тому, що граф G розглядається як вхідна структура:

$$G = (V, E),$$

де V – множина вузлів (nodes),

E – множина ребер (edges), що з'єднують вузли.

Кожен вузол $v \in V$ може мати власні атрибути h_v (наприклад, вектор ознак). Ребра можуть бути спрямованими або не спрямованими, з вагами або без них.

Завдання GNN може полягати в наступному:

- Прогнозування на рівні вузлів: класифікація або регресія для кожного вузла (наприклад, виявлення впливових користувачів у соціальній мережі).

- Прогнозування на рівні ребер: аналіз зв'язків між вузлами (наприклад, рекомендація потенційних друзів або контенту).

- Прогнозування на рівні графа: класифікація графа (наприклад, задача визначення типу соціальної мережі).

Ідея роботи GNN полягає в тому, що GNN використовують принцип агрегації сусідньої інформації: кожен вузол отримує інформацію від своїх сусідів і оновлює власне представлення.

Робота GNN складається з кількох ключових етапів:

1. Ініціалізація вузлів: початкове представлення вузлів задається їх атрибутами (або випадково).

2. Агрегація сусідніх вузлів: кожен вузол збирає інформацію зі своїх сусідів. Типові функції агрегації: Середнє значення (mean), Сума (sum), Максимум (max).

Наприклад, для вузла v :

$$m_v = \text{AGGREGATE}(\{h_u | u \in \text{Neighbors}(v)\}),$$

де h_u – вектор ознак сусіднього вузла.

3. Оновлення вузлів: на основі агрегованої інформації вузол оновлює свій стан:

$$h_v^{(t+1)} = \text{UPDATE}(h_v^{(t)}, m_v),$$

де t – поточний крок ітерації.

4. Численні шари (layers): мережа складається з декількох шарів, що також дозволяє вузлам отримувати інформацію й від найбільш віддалених сусідів.

5. Фінальна проєкція: на цьому етапі представлення вузлів, ребер або графа передається у функцію активації чи класифікації.

Загалом можна виділити основні важливі переваги GNN:

- Гнучкість: підходить для роботи з різними типами графів (статичні, динамічні, багаторівневі).

- Ефективність: інтегрує локальну та глобальну інформацію графа.

- Широкий спектр застосувань: соціальні мережі, біоінформатика, рекомендаційні системи, аналіз знань.

Графові нейронні мережі є інноваційним інструментом для аналізу графових структур. Вони надають широкі можливості для прогнозування соціальних зв'язків, визначення ключових елементів мережі та побудови моделей, що здатні враховувати складну взаємодію між елементами систем [7].

Для оцінки значущості вузлів у графі пропонується використання алгоритму PageRank. Його гнучкість і простота роблять його популярним у багатьох областях, від ранжування вебсторінок до аналізу соціальних мереж. Завдяки можливості адаптації до різних типів даних PageRank залишається одним із найважливіших алгоритмів у сфері графового аналізу [8]. Таким чином впровадження PageRank дозволить провести аналіз впливовості користувачів та хештегів.

Основна ідея алгоритму полягає у визначенні важливості вебсторінок на основі кількості та якості посилань на них [9].

PageRank базується на припущенні, що важливість вузла залежить від кількості вхідних зв'язків і ваги цих зв'язків. Якщо вузол має багато вхідних ребер від важливих вузлів, він сам стає важливим.

Нехай $G = (V, E)$ – граф із вузлами V і ребрами E .

Вагу вузла v визначають за формулою:

$$PR(v) = (1 - d) + d \sum_{u \in \text{In}(v)} \frac{PR(u)}{\text{OutDegree}(u)},$$

де PR – ранг вузла v ;

$\text{In}(v)$ – множина вузлів, які мають зв'язки до v ;

$\text{OutDegree}(u)$ – кількість вихідних зв'язків вузла u ;

d – коефіцієнт демпінгу (зазвичай $d = 0.85$), який враховує ймовірність переходу на випадковий вузол.

Для обчислення PageRank використовується матрична форма:

$$PR = d * A^T * PR + (1 - d) * 1,$$

де A – нормалізована матриця суміжності графа;

1 – вектор, де кожен елемент дорівнює 1.

Значення $PR(v)$ обчислюються ітераційно, доки не досягнуть збіжності (зазвичай за критерієм зміни менше порогу ϵ).

Вузли, що мають високе значення PageRank, мають більше вхідних зв'язків або пов'язані з іншими значущими вузлами. Це може відображати популярність хештегів й трендів, вплив користувачів у соціальних мережах або вагу інформаційних джерел. Хештеги з найвищими значеннями PageRank є найбільш значущими, і це може свідчити про потенційну можливість зростання їх популярності.

Алгоритм PageRank широко застосовується для виявлення впливових користувачів у соціальних мережах та для ранжування контенту. Він базується на структурі мережі й використовує кількість та якість посилань (взаємодій) між вузлами (користувачами або постами). Проте його недоліки полягають у статичному підході: PageRank не враховує тимчасові аспекти і може бути менш точним в умовах високої динаміки соціальних мереж. Однак існують покращені версії, такі як Time-constrained Personalized PageRank (TPPR), які враховують часову змінність, що дозволяє підвищити точність прогнозування популярності в реальних умовах соціальних мереж [10].

PageRank можна використовувати як одну з ознак при прогнозуванні майбутньої популярності хештегів чи трендів. Комбінація з графовими нейронними мережами (GNN) дозволить поєднати PageRank та ознаки вузлів, що допоможе покращити прогнози.

При використанні графових нейронних мереж для прогнозування для оцінки точності передбачення (регресії) використовуються наступні параметри:

– Середньоквадратична помилка (MSE): міра відхилення прогнозів від реальних значень.

– Середня абсолютна помилка (MAE): середня абсолютна різниця між прогнозами та реальними значеннями.

– Коефіцієнт детермінації (R^2): відображає частку дисперсії, поясненої моделлю.

Етап оцінки містить в собі такі кроки:

1. Тестування моделі: перевірка на тестовому наборі та порівняння прогнозів із фактичними значеннями.

2. Візуалізація: побудова ROC-кривої для класифікації, аналіз залишків (різниця між прогнозами та реальними значеннями) для регресії. При візуалізації результатів пропонується дотримуватись наступних принципів:

– Розмір вузлів пропорційний їх значенню PageRank.

– Колір вузлів може вказувати на категорію чи інші властивості.

3. Аналіз помилок: виявлення вузлів та категорій, для яких модель дає неправильні результати, та виявлення аномальних даних.

GNN надають можливість використовувати структуру зв'язків та індивідуальні характеристики вузлів, що забезпечує значно глибший аналіз й більш точні прогнози.

Для оцінки ефективності запропонованої моделі GNN важливо порівняти її результати з іншими методами прогнозування популярності трендів. У цьому контексті можна порівняти графову нейронну мережу з класичними підходами, такими як:

– Лінійна регресія: може бути використана для прогнозування популярності хештегів (трендів) на основі простих ознак, таких як кількість твітів чи кількість згадувань. Цей підхід є швидким та простим в реалізації. Але він не враховує контексту зв'язків між трендами, що може призвести до зниження точності прогнозів на реальних, складних даних.

– Метод на основі контентного аналізу: використання таких методів, як TF-IDF, дозволяє визначати важливість слів у хештегах. Це надає можливість з'ясувати, які слова чи фрази найбільше пов'язані з популярними трендами. Однак цей підхід має обмеження, бо не враховує динаміку змін в популярності трендів або їх взаємодії.

– Графові методи (без нейронних мереж): алгоритми, які використовують тільки графову структуру (наприклад, алгоритм PageRank чи центральність вузлів), здатні допомогти оцінити важливість окремих хештегів на основі їх зв'язків в графі. Такі методи можуть давати хороші результати при визначенні ключових трендів, якщо взаємодія між ними має великий вплив. Проте такі підходи не мають можливості глибокого навчання, тому не здатні захопити складні залежності.

– Графові нейронні мережі (GNN): забезпечують більш глибоке розуміння складних взаємодій між хештегами та трендами. Вони не тільки оцінюють індивідуальну популярність хештегів (трендів), а й враховують, як вони пов'язані між собою. Це дозволяє моделі швидко адаптуватися до змін у мережі та передбачати взаємний вплив трендів. Недолік підходу полягає в тому, що графові нейронні мережі потребують значних обчислювальних ресурсів. Також вони можуть

бути складними для налаштування, якщо дані мають низьку якість або містять багато шуму.

В межах дослідження було також виявлено сильні та слабкі сторони пропонованої моделі.

Сильні сторони:

- Робота з графовими структурами: GNN ефективно працюють з даними у вигляді графів, адже враховують зв'язки між різними трендами. Це дозволяє моделі вивчити, як хештеги та тренди взаємодіють між собою, що є важливим для точного прогнозування в динамічних соціальних мережах.

- Гнучкість і адаптивність: GNN здатні адаптуватися до змін у мережах та вивчати складні нелінійні залежності між трендами. Це дозволяє точніше прогнозувати їх майбутню популярність.

- Можливість обробки великих даних: графові нейронні мережі здатні обробляти великі об'єми даних з багатьма зв'язками. Це робить їх потужним інструментом для прогнозування популярності хештегів та трендів й на великих платформах, таких як Twitter чи YouTube.

- Передбачення складних залежностей: модель здатна прогнозувати не лише індивідуальні зміни популярності трендів, а також й їх взаємний вплив у мережі.

Слабкі сторони:

- Необхідність в обчислювальних ресурсах: GNN є складними для обчислювання, а для їх навчання необхідні значні ресурси. Особливих ресурсів потребують великі графи з численними зв'язками між вузлами.

- Залежність від якості даних: GNN є чутливими до якості вхідних даних. Якщо дані про хештеги не є достатньо точними або містять багато шуму (наприклад, відсутність точних даних про популярність), то це може призвести до зниження точності прогнозів.

- Потрібен великий обсяг даних для навчання: для того, щоб навчити модель правильно розпізнавати залежності, потрібно мати великий обсяг даних. Для малих наборів даних GNN можуть не дати значущих результатів.

- Можливі проблеми при інтерпретації результатів: графові нейронні мережі можуть бути достатньо складними для коректної інтерпретації. Проблеми можуть виникнути в ситуаціях, де важливо розуміти, чому модель зробила той чи інший прогноз. Це може заважати належному поясненню результатів прогнозу користувачам.

Але незважаючи на наявність слабких сторін, запропонована модель GNN демонструє хороші результати при прогнозуванні популярності хештегів або трендів. Особливо результативним є використання моделі в тих ситуаціях, коли наявні складні залежності між трендами. Однак ефективність пропонованої моделі значним чином залежить від якості вхідних даних та наявності достатніх обчислювальних ресурсів для навчання на великих графах.

Висновки

В роботі було розглянуто останні дослідження та методи для вирішення задачі прогнозування популярності хештегів в соціальних мережах. Після цього було запропоновано модель з використанням графових нейронних мереж та алгоритму PageRank. Важливим внеском цієї роботи є досягнення ранжування користувачів на основі поширення впливу в соціальних мережах.

Також у процесі дослідження було зроблено порівняння з іншими моделями нейронних мереж, де розроблена модель надає більш високу точність передбачення ніж інші.

Загалом при використанні графових нейронних мереж в динамічних соціальних мережах вони мають переваги над іншими розглянутими методами. А використання алгоритмів PageRank допомагає підвищити інтерпретованість результатів.

Отримані в результаті дослідження висновки мають практичне значення для використання в інформаційній безпеці та маркетинговій аналітиці. Так практичні рекомендації для соціальних мереж та маркетологів, наприклад, можуть складатись з декількох ключових напрямків. По-перше, для аналізу поточних популярних хештегів та трендів можна використовувати модель для виявлення актуальних тем, які активно обговорюються. Наприклад, у мережі Twitter доцільно буде виділяти ключові хештеги та аналізувати їхні зв'язки. Це дозволить розділити аудиторію за інтересами й пропонувати користувачам персоналізований контент. Ще одним важливим завданням є моніторинг впливових вузлів та впливових користувачів. PageRank або інші графові метрики можуть допомогти визначити тих користувачів, які найбільше впливають на розповсюдження інформації в мережі. Спільна робота маркетологів з такими користувачами допоможе підтримувати та просувати тренди, що може сприяти просуванню брендів.

Перелік використаних джерел

- [1] Mercer S. Social Network Analysis and Complex Dynamic Systems. *Motivational Dynamics in Language Learning*. Multilingual Matters, 2014. Pp. 73-82. DOI: <https://doi.org/10.21832/9781783092574-010>.
- [2] Halliday M. A. K., Hasan R. Language, context, and text: aspects of language in a social-semiotic perspective. Oxford : Oxford University Press, 1985. 126 p.
- [3] Прогнозування поведінки об'єктів соціальних мереж / І. Івченко та ін. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 341(5). С. 317-321. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-46>.
- [4] Руденко А. Соціальні мережі як ефективний засіб громадської самоорганізації в сучасній Україні. Київ, 2018. 17 с. URL: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2018->

- [05/Rudenko-52ea7.pdf](#) (дата звернення: 21.08.2025).
- [5] Туманов О. О. Статистичні методи аналізу даних соціальних медіа. *Бізнесінформ*. 2020. № 2. С. 266-272. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-2-266-272>.
- [6] Рябова К. Статистичний аналіз хештегів (на матеріалі соціальних мереж Twitter, Instagram і Google). URL: https://kamts1.kpi.ua/sites/default/files/files/riabova_statustuchnuy.pdf (дата звернення: 17.07.2025).
- [7] Hashtag recommendation for enhancing the popularity of social media posts / Chakrabarti P., Malvi E., Bansal S., Kumar N. *Social network analysis and mining*. 2023. № 13(1). Article 21. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13278-023-01024-9>.
- [8] A Gentle Introduction to Graph Neural Networks / Sanchez-Lengeling B., Reif E., Pearce A., Wiltchko A. B. *Distill*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.23915/distill.00033>.
- [9] Heavey A., Karagöz E. Analysing Credibility of Twitter Users Using the PageRank Algorithm. Bachelor's Thesis in Computer Science. Stockholm, 2017. 27 p.
- [10] Роль хештегов у соціальних мережах. URL: <https://webnauts.pro/uk/blog/rol-heshtegov-u-soczialnyh-merezhah/> (дата звернення: 28.08.2025).

GRAPH NEURAL NETWORKS AND PAGERANK ALGORITHMS IN THE PROBLEMS OF PREDICTING THE POPULARITY OF HASHTAGS IN SOCIAL NETWORKS

Levytska T.O.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3359-1313>, e-mail: levitskaya_t_a@pstu.edu;

Kotykova L.D.

assistant, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5008-622X>, e-mail: kotykova_l_d@pstu.edu

The article explores modern Graph Neural Networks (GNN) and PageRank algorithms as tools for solving the task of predicting the popularity of hashtags in social media. It examines the capabilities and specific features of their application. As part of the study, existing methods and approaches to this problem were analyzed, revealing opportunities for improvement. The relevance of the research is driven by the rapid growth of information volumes in social networks and the need for effective analysis of its dissemination. The concept of hashtags, their structural characteristics, and behaviour in social media are also discussed. A predictive model based on Graph Neural Networks and PageRank algorithms is presented. An analysis of current GNN architectures has been carried out, and the stages and features of their work have been reviewed. Modifications of PageRank, particularly Time-constrained Personalized PageRank, are also considered. In comparison with other models designed for similar tasks, the advantages and disadvantages of the proposed approach – combining GNNs with PageRank – are highlighted. A key advantage of the presented predicting model is that it will also help to account for user influence and their role in the popularization of content, which allows us also to understand better the dynamics of the distribution of information in social networks. Additionally, the research presents results that confirm the effectiveness of the combined approach compared to classical machine learning algorithms. The study also identifies the strengths and weaknesses of the proposed model and provides practical recommendations for its application. The results may be useful, for example, for tasks such as content analysis, targeted advertising, and managing information flows in social media.

Keywords: social networks, prediction, hashtag, graph neural networks, PageRank.

References

- [1] S. Mercer, "Social Network Analysis and Complex Dynamic Systems," in *Motivational Dynamics in Language Learning*, Multilingual Matters Publ., 2014, pp. 73-82. doi: 10.21832/9781783092574-010.
- [2] M.A.K. Halliday, and R. Hasan, *Language, context, and text: aspects of language in a social-semiotic perspective*. Oxford : Oxford University Press, 1985.
- [3] I. Ivchenko, O. Haidaienko, N. Knyrik, H. Morozova, and D. Grybeniuk, "Prohnozuvannia povedinky obektiv sotsialnykh merezh" ["Forecasting the behavior of social media objects"], *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universy-tetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, № 341(5), pp. 317-321, 2024. doi: 10.31891/2307-5732-2024-341-5-46. (Ukr.)
- [4] A. Rudenko, *Sotsialni merezhi yak efektyvnyi zasib hromadskoi samoorhanizatsii v suchasnii Ukraini* [Social networks as an effective means of community self-organization in modern Ukraine]. Kyiv, Ukraine, 2018. [Online]. Available: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2018-05/Rudenko-52ea7.pdf>. Accessed on: August 21, 2025.
- [5] O.O. Tumanov, "Statystychni metody analizu danykh sotsialnykh media" ["The Statistical Methods for Analyzing Social Media Data"], *Biznesinform– Business Inform*, № 2, pp. 266-272, 2020. doi: 10.32983/2222-4459-2020-2-266-272. (Ukr.)

- [6] K. Riabova, Statystychnyi analiz kheshtehiv (na materialy sotsialnykh merezh Twitter, Instagram i Google) (Statistical analysis of hashtags (based on social networks Twitter, Instagram and Google)). [Online]. Available: https://kamts1.kpi.ua/sites/default/files/files/riabova_statustuchnuy.pdf. Accessed on: July 17, 2025. (Ukr.)
- [7] P. Chakrabarti, E. Malvi, S. Bansal, and N. Kumar, "Hashtag recommendation for enhancing the popularity of social media posts," *Social network analysis and mining*, № 13(1), article 21, 2023. doi: **10.1007/s13278-023-01024-9**.
- [8] B. Sanchez-Lengeling, E. Reif, A. Pearce, and A.B. Wilschko, "A Gentle Introduction to Graph Neural Networks," *Distill*, 2021. doi: **10.23915/distill.00033**.
- [9] A. Heavey, and E. Karagöz, "Analysing Credibility of Twitter Users Using the PageRank Algorithm," Bachelor's Thesis in Computer Science, Stockholm, 2017.
- [10] Rol kheshtehov u sotsialnykh merezhakh (The role of hashtags in social networks). [Online]. Available: <https://webnauts.pro/uk/blog/rol-heshtegov-u-soczi-alnyh-merezhah/>. Accessed on: August 28, 2025. (Ukr.)

Стаття надійшла 09.09.2025

Стаття прийнята 28.09.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Левицька Т. О., Котихова Л. Д. Графові нейронні мережі та алгоритми PageRank у задачах прогнозування популярності хештегів у соціальних мережах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 50-56. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344600>.

133 ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.753.042

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344644

ОПТИМАЛЬНІ МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ КЕРНІВ КЛЕЩЕВИХ ЗАХВАТІВ КОЛОДЯЗНИХ КРАНІВ

Лаврик В.П.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8162-7082 , e-mail: lavrik_v_p@pstu.edu ;
Суглобов В.В.	д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1743-0894 , e-mail: suglobov_v_v@pstu.edu ;
Шишкін В.В.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5943-2180 , e-mail: shishkin_v_v@pstu.edu

Серед багатьох типів підйомно-транспортних машин, що застосовуються в прокатному виробництві, значне місце займають спеціальні колодязні крани. Для забезпечення високої продуктивності прокатного цеху, високої якості прокату та безпечної роботи персоналу необхідно приділити особливу увагу надійності роботи таких кранів. Підвищення вимог до якості прокату з одночасним збільшенням маси сталевих зливків розкрило в роботі допоміжного підйомно-транспортного устаткування ряд істотних недоліків. Один з них – транспортування і посадка зливків у колодязі, видача їх у прокатку після нагрівання, за допомогою кліщових захватів з робочими органами у вигляді кернів. Стійкість кернів і надійність затискання зливків порівняно невелика і їх змінюють досить часто (6-7 штук у зміну). Середньомісячна витрата кернів в процесі експлуатації колодязних кранів становить близько 1200 одиниць. Використання пошкоджених кернів і несвоєчасна їх заміна призводить до ненадійного захоплення зливків, що може привести до травм працівників підприємства, руйнування колодязної печі та іншого металургійного обладнання. Для вибору оптимальних шляхів продовження терміну служби керна було проведено аналіз досліджень температурних умов служби кернів кліщових кранів. Встановлено, що в процесі роботи кернів відзначається циклічна зміна температур: від 1200°C на поверхні керна до 100°C при його охолодженні у баках з водою. У період між захопленнями зливків коливання температури досягають 300-400°C. В результаті циклічної зміни температури виникають значні термічні напруги. Якщо врахувати, що керни піддаються додатковому спектру навантажень, таких як ударні, стискаючі і зминаючі, то це призводить до утворення тріщин розпалу. При подальшій експлуатації кернів у такому режимі сітка розпалу сприяє інтенсивному зносу, зминанню, відколам. Розробка оптимальних способів відновлення та зміцнення кернів колодязних кранів включає кілька ключових етапів: 1. Діагностика та оцінка стану кернів. Аналіз умов експлуатації та режимів роботи для встановлення причин зношення та утворення дефектів; 2. Вибір методу відновлення. Наплавлення з подальшою механічною обробкою – використовується для ліквідації глибоких пошкоджень і досягнення необхідних розмірів і властивостей; 3. Контроль якості відновлених кернів. Використання неруйнівних методів контролю для оцінки стану зварних швів та наплавлених поверхонь; 4. Тестування та дослідна експлуатація. Випробування на стендах і у виробничих умовах для підтвердження надійності та безпеки. 5. Аналіз результатів дослідної експлуатації для оптимізації процесів відновлення.

Ключові слова: колодязний кран, керни кліщовин, зносостійка наплавка, напіваавтоматичне наплавлення, електрошлакове наплавлення, сітка розпалу, армований кран, порошковий дрот.

Постановка проблеми

Вантажозахоплюючі кліщі є найбільш відповідальним і навантаженим вузлом кліщового металургійного крану. Цей пристрій виконує функцію захоплення та утримання зливка під час посадки у нагрівальні колодязі, підйому та його транспортування. Продуктивність технологічного процесу прокатки значною мірою залежить від безперебійної і надійної роботи кліщового захоплювача. Маса зливка складає 20 т, а температура після нагрівання – 1260-1280°C. Основними робочими елементами кліщового захоплювача є керни. Вони отримують значні і повторювальні термо-механічні навантаження.

У процесі роботи крана керни досить часто змінюють (6-7 штук на зміну) через появу дефектів. Дефекти призводять до погіршення умов тиску і утримання зливка кліщами. Для відновлення роботи крану, стабільної його експлуатації без частих зупинок можна запропонувати використання або нової конструкції керна, або відновлення і зміцнення робочої поверхні кернів за допомогою зносостійкого наплавлення.

З матеріалів аналізу випливає, що дослідження температурних умов роботи кернів та вибір способу їх відновлення та зміцнення має велике значення у питанні надійної роботи кранового металургійного обладнання. Тому дослідження, спрямовані на вибір оптимального способу відновлення та зміцнення робочої

частини кернів колодязних кранів, є важливим та актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналізу умов роботи металургійних кранів і вантажозахоплювальних пристроїв присвячено багато класичних робіт, в яких детально розглянуто питання вибору конструкцій вантажозахоплювальних пристроїв, їх проектування та силового аналізу, а також надано рекомендації щодо експертної оцінки технічного стану вантажозахоплювальних пристроїв. Цикл наукових публікацій [1-4] присвячено огляду та вибору конструкцій затискних та захоплювальних пристроїв. У роботах [5-6] проведено огляд існуючих конструкцій кернів колодязних кранів, проаналізовані їх переваги та недоліки. На підставі виконаного силового розрахунку кліщового захоплювача колодязного крана авторами запропоновані нові, більш ефективні конструкції кернів і рекомендації щодо їх застосування.

Мета статті

Виконати огляд та провести аналіз температурних умов експлуатації кернів кліщових кранів, а також встановити причини виникнення значних термічних і фазових напружень. Ідентифікувати чинники, що спричиняють появу тріщин розпаду на поверхні керна. На підставі проведеного огляду і аналізу запропонувати способи відновлення та зміцнення робочої поверхні керна з високими фізико-механічними властивостями.

Виклад основного матеріалу

Керни є основними робочими елементами кліщового крана, який служить для посадки зливків у нагрівальні колодязі та видачі гарячих зливків для прокатки на блюмінгу та слябінгу. Маса зливка останніми роками досягає 20 т і більше, температура після нагрівання складає 1260-1280°C. У процесі експлуатації керни багаторазово нагріваються до вказаних температур при транспортуванні зливків і охолоджуються під впливом навколишнього повітря, а також при замочуванні в баках з водою. Крім цього, відзначається інтенсивне зношування їх робочої поверхні. Наслідком є швидкий вихід кернів із ладу (рис. 1).

Більшість кернів вибраковують в результаті зминання, затушення і зносу робочої частини, а також появи розвиненої сітки розпаду на робочій поверхні. Іноді відзначається пластична деформація кінця керна, який виступає з кліщовини. Тривалість роботи кернів вимірюється годинами і їх змінюють досить часто (6-7 штук у зміну). Середньомісячна витрата кернів в процесі експлуатації колодязних кранів обтискного цеху становить близько 1200 шт.



Рис. 1 – Контейнер із відпрацьованими кернами

Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України проведені дослідження динаміки температурних змін поверхні та перерізу кернів, виготовлених різними методами. Було встановлено, що в результаті циклічної зміни температури виникають значні термічні напруження. Підсумовуючи з фазовими і з діючими напруженнями від навантажень, вони перевищують межу міцності окремих мікрооб'єктів, в результаті чого утворюються тріщини розпаду. Розвинена сітка розпаду сприяє інтенсивному зносу і, як наслідок, зминання, притуплення та вибракування кернів.

Враховуючи, що відновлена деталь повинна бути достатньо довговічною і надійною в експлуатації, мати якісні показники, як у новій деталі, запропоновано застосування сучасних методів ремонту, що дозволяє не тільки відновити деталі, але і поліпшити їх експлуатаційні характеристики.

Дослідження показали, що покращити працездатність і збільшити термін служби кернів доцільно наступними методами.

1) Шляхом ремонту та відновлення за допомогою наплавлення на їх робочу поверхню шару з високими фізико-механічними властивостями.

2) Створенням нової конструкції керна з покращеними властивостями.

Наплавлення зносостійкими сплавами є одним із найбільш універсальних, економічно доцільних і широко застосовуваних у народному господарстві способів відновлення та виготовлення деталей машин і механізмів. Цей процес забезпечує надання робочим поверхням спеціальних властивостей, що сприяють підвищенню їх зносостійкості та збільшенню строку служби.

Наплавлення являє собою процес нанесення розплавленого присадкового металу на спеціально підготовлену поверхню деталі, яка виготовляється або ремонтується. У результаті взаємодії наплавленого шару з основним металом утворюється сплав із високими механічними та експлуатаційними характеристиками.

У промисловості, будівництві, транспорті та сільському господарстві використовуються практично всі відомі способи й різновиди наплавлення. Постійно удосконалюються та впроваджуються у виробництво прогресивні технології, такі як дугове наплавлення порошковими дротами й стрічками, електрошлакове, індукційне, вібродугове, плазмове тощо.

На виконання зносостійкої та відновлювальної наплавки витрачається понад 5% усіх електродів, близько 11% зварювального дроту суцільного перерізу та майже половина всього порошкового дроту.

Потреба України в наплавочних матеріалах – електродах, порошкових дротах і стрічках – повністю забезпечується завдяки їх виробництву на значній кількості малих підприємств і в спеціалізованих цехах промислових підприємств. Найбільшим із них є цех із виробництва порошкового дроту потужністю 6000 тон на рік, що функціонує на Нижньодніпровському заводі металовиробів у місті Дніпро.

Збільшення обсягів застосування технологій наплавлення у виробництві сприяє суттєвій економії металу як за рахунок відновлення зношених деталей, так і завдяки підвищенню їх зносостійкості та подовженню строку служби машин і конструкцій.

Відновлення шляхом наплавлення робочої частини.

Найбільш поширеними способами відновлення розмірів зношених деталей і нанесення поверхневих шарів з заданими експлуатаційними характеристиками є наплавлення. Серед відомих його способів на практиці широко застосовується ручне дугове наплавлення штучними електродами, механізоване під шаром флюсу, напівавтоматичне, в середовищі захисних газів плавкими і неплавкими електродами, плазмове, вібродугове і газополум'яне наплавлення [6, 7, 8].

Ручне дугове наплавлення є найбільш поширеним методом, що відзначається простотою технологічного процесу та обладнання, яке використовується. Його перевагою є універсальність – можливість застосування для ремонту деталей різних конструкцій, розмірів і конфігурацій. До основних недоліків цього методу належать нестабільність якості наплавленого шару, невисока продуктивність та складні умови праці оператора.

Механізоване наплавлення під шаром флюсу (рис. 2) відрізняється вищою стабільністю процесу. У зону горіння дуги за допомогою спеціального обладнання безперервно подається електродний дріт або стрічка. Зона дугового розряду та ванна розплавленого металу захищаються шаром гранульованого флюсу спеціального складу, який запобігає окисненню і сприяє формуванню якісного наплавленого шару. Переміщення дуги вздовж поверхні виробу здійснюється автоматично, що забезпечує стабільність розмірів наплавлених валиків, однорідність хімічного складу і властивостей наплавленого металу.

Однак цей спосіб більше застосовується для нанесення порівняно великого об'єму наплавленого металу і відновлення громіздких виробів.

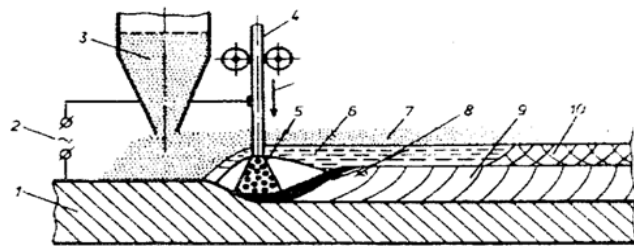


Рис. 2 – Схема наплавлення під шаром флюсу: 1 – виріб; 2 – джерело живлення; 3 – флюсоживильник; 4 – механізм подачі дроту; 5 – зварювальна дуга; 6 – розплавлений шлак; 7 – шар флюсу; 8 – зварювальна ванна; 9 – наплавлений валик; 10 – шлакова кірка

Найпоширенішим методом є напівавтоматичне наплавлення плавким електродом в середовищі захисних газів (рис. 3). У цьому випадку зона горіння дуги і розплавлений метал захищаються від повітря струменем інертного або вуглекислого газу. Цей метод наплавлення застосовують в тих випадках, коли ускладнене або неможливе наплавлення під флюсом (при наплавленні внутрішніх поверхонь глибоких отворів, дрібних деталей або деталей складної конфігурації, крайок виробу, коли утримання флюсу на поверхні виробу становить значні труднощі). З урахуванням конфігурації зношеної поверхні керна цей варіант відновлення є оптимальним.

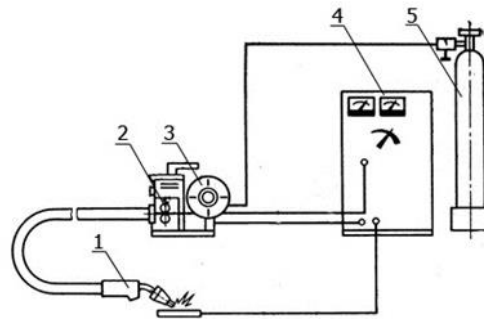


Рис. 3 – Напівавтоматичне наплавлення в середовищі захисних газів: 1 – пальник; 2 – механізм подачі; 3 – касета; 4 – джерело живлення; 5 – балон із захисним газом

Спосіб напівавтоматичного наплавлення кернів (рис. 4) може бути реалізований з використанням самозахисного порошкового дроту ВЕЛТЕК-Н480С Ø2,4 мм з системою легування C-Si-Mn-Cr-W-Mo-Ti-V (табл. 1).

Таблиця 1
Режими наплавлення порошкового дроту ВЕЛТЕК-Н480С

Діаметр, мм	Ісв, А	Уд, В
1,6	200-300	24-28
2,4	200-350	24-30

Це дозволить досягти твердості робочої поверхні керна до 47-53 HRC. Зазначений порошковий дріт застосовується для наплавлення деталей, які працюють в умовах тертя металу по металу у поєднанні з термічною втомою і високим питомим тиском. Застосування дроту дозволить:

- досягти хімічного складу наплавленого металу типу Нп-30Х4В2М3ФСТ;
- забезпечити твердість наплавленого металу 47-53 HRC;
- підвищити теплостійкість поверхні і опір зносу при терті металу по металу.

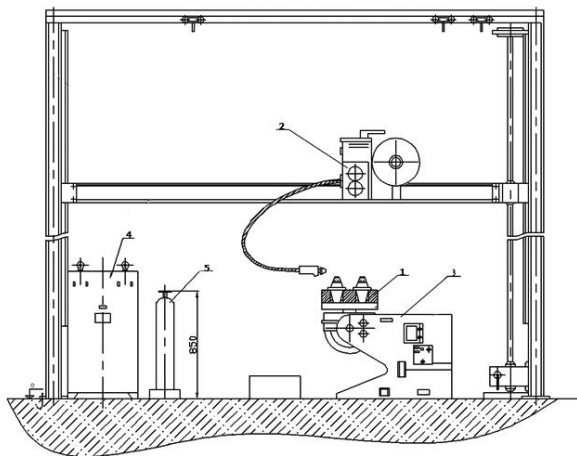


Рис. 4 – Устаткування напівавтоматичного наплавлення із застосуванням самозахисного порошкового дроту:
1 – керни; 2 – апарат для напівавтоматичного наплавлення;
3 – маніпулятор; 4 – апарат управління; 5 – газовий балон

Відновлений дослідний зразок керну представлено на рисунку 5.



Рис. 5 – Зовнішній вигляд керна після наплавлення

У тих випадках, коли в процесі експлуатації відбувся більш значний знос поверхні керна (відколи), можливе застосування стико-шлакового наплавлення (рис. 6). Процес починається наведенням шлакової ванни на дні форми, яка охолоджується водою. Електродом служить хвостовик з привареною пластиною або прутиком з легованого металу, які і розплавляються в першу чергу. У момент занурення хвостовика у шлак швидкість подачі спочатку зменшують (для прогріву торця деталі), а потім збільшують до занурення деталі в металеву ванну. Відбувається зварювання хвостовика і керна.

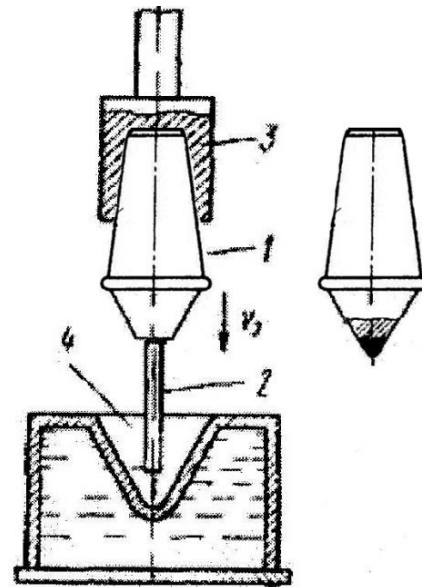


Рис. 6 – Стики-шлакове наплавлення:
1 – керн; 2 – легований електрод; 3 – утримувач; 4 – мідний кокіль [8]

Коли треба наплавити порівняно великі маси металу застосовують електрошлакове наплавлення (рис. 7).

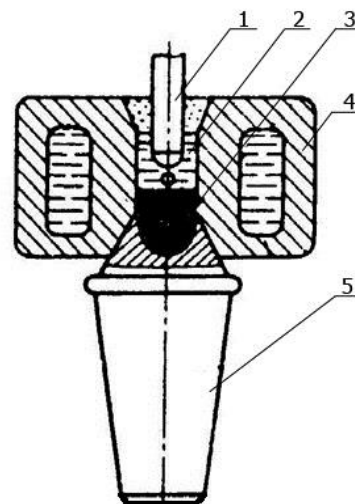


Рис. 7 – Електрошлакове наплавлення:
1 – електрод; 2 – шлакова ванна; 3 – наплавлений метал;
4 – кокіль; 5 – керн [6, 7]

При електрошлаковому наплавленні присадочний метал розплавляється у ванні флюсу (шлаку), який попередньо розплавляється під дією електричного струму. Присадочний метал 1 (пруток зі сталі 3Х2В8 або іншої марки) розплавляється в шлаковій ванні 2 і наплавляється (осаджується) на зношений кінець керна 5. На початку наплавлення кінець керна нагрівається до зварювальної температури розплавленим

шлаком (температура ванни близько 2000°C). Формування шлакової ванни і розплавленого металу 3 відбувається у коклі 4, що має водяне охолодження.

Аналіз видів зносу і способів відновлення та зміцнення кернів показав, що найбільш прийнятними з наведених способів наплавлення є:

- напівавтоматичне наплавлення із застосуванням самозахисного порошкового дроту;
- електрошлакове наплавлення.

Конструкція керна з твердосплавними вставками.

Для підвищення зносостійкості робочої поверхні керна крім зміцнюючого наплавлення перспективним є застосування методу армування робочої поверхні керна твердосплавними вставками (рис. 8) [9, 10].

Для підвищення твердості в робочу частину керна виготовленого зі Ст.45 встановлюється високоміцна вставка зі Ст.3Х2В8. Зносостійка вставка обжимається у гарячому стані.

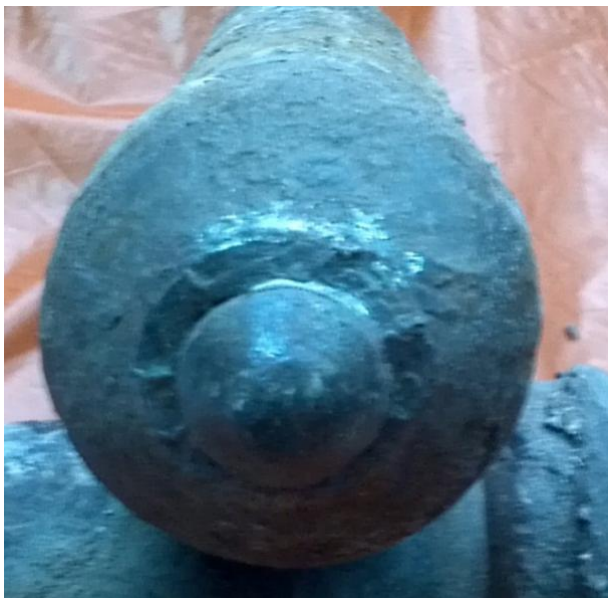


Рис. 8 – Зовнішній вигляд армованого керна

Розробка оптимальних методів відновлення та зміцнення кернів колодязних кранів може включати кілька ключових етапів.

1. Діагностика та оцінка стану кернів:

- виконання візуального огляду та застосування неруйнівних методів контролю для визначення ступеня зношення та характеру пошкоджень;
- аналіз умов експлуатації та режимів роботи для встановлення причин зношення та утворення дефектів.

2. Вибір методу відновлення [11, 12, 13]:

- механічна обробка – застосовується при незначних дефектах для відновлення геометрії;
- наплавлення з подальшою механічною обробкою – використовується для ліквідації глибоких пошкоджень і досягнення необхідних розмірів і властивостей. Спосіб напівавтоматичного наплавлення кернів

може бути реалізований з використанням самозахисного порошкового дроту ВЕЛТЕК-Н480С Ø2,4 мм з системою легування C-Si-Mn-Cr-W-Mo-Ti-V;

- термічна обробка – забезпечує підвищення твердості та зносостійкості [14, 15];

- покриття зі спеціальними властивостями для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості кернів (металокерамічні сплави, сплави на основі нікелю та кобальту, карбіду вольфраму, антифрикційні матеріали) [16].

3. Контроль якості відновлених кернів:

- проведення вимірювань і випробувань для перевірки відповідності технічним вимогам;
- використання неруйнівних методів контролю для оцінки стану зварних швів та наплавлених поверхонь.

4. Тестування та дослідна експлуатація:

- випробування на стендах і у виробничих умовах для підтвердження надійності та безпеки;
- аналіз результатів дослідної експлуатації для оптимізації процесів відновлення.

Така систематизація та оптимізація процесу відновлення кернів дозволить збільшити термін служби обладнання, скоротити витрати на придбання нових компонентів та підвищити загальну ефективність виробничого процесу.

Висновки

1. Проаналізовано температурні умови експлуатації кернів кліщових кранів, визначено основні фактори та причини появи тріщин розпаду на робочій поверхні, а також виникнення інтенсивного зносу, змінання й відколів.

2. Проаналізовані методи покращення працездатності та збільшення терміну служби кернів шляхом створення їх нової конструкції, а також відновлення й зміцнення за допомогою зносостійкого наплавлення.

3. Запропоновано зносостійке напівавтоматичне наплавлення кернів із використанням самозахисного порошкового дроту ВЕЛТЕК-Н480С.

4. Розроблено етапи відновлення та зміцнення кернів колодязних кранів.

Перелік використаних джерел

- [1] Гребеник В. М., Иванченко Ф. К., Ширяев В. И. Расчет металлургических машин и механизмов. К.: Вища шк., Головне вид-во, 1988. 448 с.
- [2] Лаврик В. П., Суглобов В. В., Жижкін С. В. Аналіз причин виходу з ладу кернів колодязного крану. *Університетська наука-2020*: Міжн. науково-техн. конф., м. Маріуполь, 19-20 травня 2020 р. : в 4 т. Маріуполь, 2020. Т. 2. С. 100-102.
- [3] Лаврик В. П., Суглобов В. В., Жижкін С. В. Розробка оптимальних методів відновлення і зміцнення кернів колодязного крану. *Університетська наука-2020* : Міжн. науково-техн. конф.,

- м. Маріуполь, 19-20 травня 2020 р. : в 4 т. Маріуполь, 2020. Т. 2. С. 102-103.
- [4] Суглобов В. В., Лаврик В. П., Шишкін В. В. Силовий розрахунок кліщового захоплювача і нова конструкція кернів колодязного крану. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 47. С. 151-163. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300052>.
- [5] Керн вантажозахоплювального кліщового пристрою: пат. на кор. мод. 79961 Україна: МПК В66С1/00 В66С1/22. № u201212357; заявл. 29.10.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. 3 с.
- [6] Рябцев И. А. Наплавка деталей машин и механизмов. К. : Екотехнологія, 2004. 159 с.
- [7] Структура и износостойкость наплавленного металла 20Х5М2ФС, легированного серой и фосфором / И. А. Рябцев и др. *Автоматическая сварка*. 2009. № 10. С. 24-28.
- [8] Щетинін С. В., Щетиніна В. І., Десятський С. П. Підвищення тріщиностійкості бандажованих опорних валків при високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 5. С. 25-30. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.05.04>.
- [9] Ткаченко А. М., Круглікова В. В., Юхно В. А. Методичний підхід щодо визначення техніко-економічної ефективності зносостійкого наплавлення. *Держава та регіони. Серія : Економіка та підприємництво*. 2020. № 3(2). С. 129-135. DOI: <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2020-3-46>.
- [10] Втомна довговічність зразків після зносостійкого виготовного та ремонтного наплавлення / І. О. Рябцев та ін. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 9. С. 28-35. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.09.03>.
- [11] Структура та властивості конструкційних економ-нолегованих сплавів на основі титану, одержаних способом ЕПП / С. В. Ахонін та ін. *Сучасна електрометалургія*. 2020. Вип. 4. С. 7-15. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.02>.
- [12] Features of microstructure of butt joints of hypereutectoid Areal-136HE-X rail steel in flash-butt welding / V. I. Shvets et al. *The Paton Welding Journal*. 2022. Vol. 3. Pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.03.04>.
- [13] Вплив швидкості охолодження безперервнолітої заготовки, що твердне, на параметри дендритної структури вуглецевої сталі з 0,54 % С / О. І. Бабаченко та ін. *Металофізика та новітні технології*. 2021. Том 43, вип. 11. С. 1537-1551. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.11.1537>.
- [14] Tillmann W., Eilers A., Henning T. Vacuum brazing and heat treatment of NiTi shape memory alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1147. Article 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1147/1/012025>.
- [15] Вплив термічної обробки на структуру та властивості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів на основі β -фази / С. В. Ахонін та ін. *Сучасна електрометалургія*. 2021. Вип. 4. С. 51-58. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.08>.
- [16] Nesterenkov V. M., Skryabinsky V. V., Rusyn M. O. Effect of thermal cycles in electron beam welding of aluminum 1570 alloy on mechanical properties of welded joints. *The Paton Welding Journal*. 2021. Vol. 5. Pp. 40-45. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.06>.

OPTIMAL METHODS FOR RESTORATION AND STRENGTHENING OF PLIERS' CORE GRIPS OF WELL CRANE

Lavryk V.P.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8162-7082 , e-mail: lavrik_v_p@pstu.edu ;
Suglobov V.V.	D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1743-0894 , e-mail: suglobov_v_v@pstu.edu ;
Shishkin V.V.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5943-2180 , e-mail: shishkin_v_v@pstu.edu

Among the many types of lifting and conveying machines used in rolling production, special well cranes occupy a significant place. To ensure high productivity of the rolling mill, high quality of rolled products, and safe operation of personnel, special attention must be paid to the reliability of such cranes. Increasing requirements for the quality of rolled products with a simultaneous increase in the mass of steel ingots revealed a number of significant shortcomings in the operation of auxiliary lifting and transport equipment. One of them is the transportation and placement of ingots in the well, their delivery for rolling after heating, using pincer grippers with working bodies in the form of cores. The durability of the cores and the reliability of clamping the ingots are relatively low and they are changed quite often (6-7 pieces per shift). The average monthly consumption of cores during the operation of well cranes is about 1200 units. The use of damaged cores and their untimely replacement leads to unreliable ingot capture, which can lead to injuries to enterprise employees, destruction of the shaft furnace and other metallurgical equipment. To select the optimal ways to extend the

service life of the core, an analysis of the temperature conditions of the service of the cores of pincer cranes was conducted. It was established that during the operation of the cores, a cyclic change in temperature is observed: from 1200°C on the core surface to 100°C when it is cooled in water tanks. In the period between ingots being captured, temperature fluctuations reach 300-400°C. As a result of the cyclic temperature change, significant thermal stresses arise. If we consider that the cores are subjected to an additional range of loads, such as impact, compression and crushing, this leads to the formation of ignition cracks. With further operation of the cores in this mode, the ignition grid contributes to intensive wear, crushing, and chipping. Developing optimal methods for restoring and strengthening wellhead cores involves several key steps: 1. Diagnostics and assessment of core condition. Analysis of operating conditions and operating modes to determine the causes of wear and defect formation; 2. Choosing a restoration method. Surface treatment with subsequent machining is used to eliminate deep damage and achieve the required dimensions and properties; 3. Quality control of recovered cores. Use of non-destructive testing methods to assess the condition of welds and surfacing surfaces; 4. Testing and pilot operation. Bench and production tests to confirm reliability and safety. Analysis of pilot operation results to optimize recovery processes.

Keywords: well crane, cast iron cores, wear-resistant surfacing, semi-automatic surfacing, electrosag surfacing, ignition grid, reinforced core, flux-cored wire.

References

- [1] V.M. Hrebenyk, F.K. Ivanchenko, and V.I. Shyriaiev, *Raschet metallurhicheskikh mashyn y mekhanizmov* [Calculation of metallurgical machines and mechanisms]. Kyiv: Vyshcha shkola, Holovne vyd-vo Publ., 1988. (Rus.)
- [2] V.P. Lavryk, V.V. Suhlobov, and S.V. Zhyzhkin, "Analiz prychnyn vykhodu z ladu kerniv kolodiaznoho kranu" ["Analysis of the causes of failure of well crane cores"], in *Proc. of the Int. sci.-tech. conf. «Universytetska nauka-2020»*, Mariupol, May 19-20, 2020, vol. 2, pp. 100-102. (Ukr.)
- [3] V.P. Lavryk, V.V. Suhlobov, and S.V. Zhyzhkin, "Rozrobka optymalnykh metodiv vidnovlennia i zmitsnennia kerniv kolodiaznoho kranu" ["Development of optimal methods for restoring and strengthening wellhead cores"], in *Proc. of the Int. sci.-tech. conf. «Universytetska nauka-2020»*, Mariupol, May 19-20, 2020, vol. 2, pp. 102-103. (Ukr.)
- [4] V.V. Suhlobov, V.P. Lavryk, and V.V. Shyshkin, "Sylovyi rozrakhunok klishchovoho zakhopliuvacha i nova konstruktsiia kerniv kolodiaznoho kranu" ["Force calculation and new design of the grip unit pliers metallurgical crane"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytet. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 47, pp. 151-163, 2023. doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300052. (Ukr.)
- [5] V.V. Suhlobov, V.A. Mikhieiev, V.P. Lavryk, and O.O. Vedmedenko, "Kern vantazhozakhopliuvального klishchovoho prystroiu" ["Core of the load-grabbing pincer device"], *UA Utility Model 79961*, May 13, 2013. (Ukr.)
- [6] I.A. Riabtsev, *Naplavka detalei mashyn y mekhanizmov* [Surfacing of Machine Parts and Mechanisms]. Kyiv: Ekotekhnolohiia Publ., 2004. (Rus.)
- [7] I.A. Riabtsev, Ya.P. Chernyak, I.I. Riabtsev, V.A. Zhdanov, and I.L. Bohaichuk, "Struktura y yznosostoičnost naplavlennogo metalla 20Kh5M2FS, lehyrovannogo seroi y fosforom" ["Structure and wear resistance of surfacing metal 20Kh5M2FS alloyed with sulfur and phosphorus"], *Avtomatycheskaia svarka – Automatic Welding*, vol. 10, pp. 24-28, 2009. (Rus.)
- [8] S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina, and S.P. Desiatskyi, "Pidvyshchennia trishchynostiikosti bandazhovanykh opornykh valkiv pry vysokoshvydkisnomu naplavlenni na nyzkii pohonnii enerhii" ["Increasing crack resistance of bandaged support rolls during high-speed surfacing at low line energy"], *Avtomatycheskaia svarka – Automatic Welding*, vol. 5, pp. 25-30, 2020. doi: 10.37434/as2020.05.04. (Ukr.)
- [9] A.M. Tkachenko, V.V. Kruhlikova, and V.A. Yukhno, "Metodychnyi pidkhid shchodo vyznachennia tekhniko-ekonomichnoi efektyvnosti znosostiikoho naplavlennia" ["The methodological approach to the determination of technical and economic efficiency of wear-resistant deposition"], *Derzhava ta rehiony. Seriya: Ekonomika ta pidpriemnytstvo – State and regions. Series: Economics and Business*, vol. 3, no. 2, pp. 129-135, 2020. doi: 10.32840/1814-1161/2020-3-46. (Ukr.)
- [10] I.O. Riabtsev, V.V. Knysh, A.A. Babinets, S.O. Solovei, and V.M. Diemienkov, "Vtomna dovho-vichnist zrazkiv pislia znosostiikoho vyhotivnoho ta remontnoho naplavlennia" ["Fatigue durability of specimens after wear-resistant manufacturing and repair surfacing"], *Avtomatycheskaia svarka – Automatic Welding*, vol. 9, pp. 28-35, 2020. doi: 10.37434/as2020.09.03. (Ukr.)
- [11] S.V. Akhonin et al., "Struktura ta vlastyvoli konstruktivnykh ekonomnolehovanykh splaviv na osnovi tytanu, oderzhanykh sposobom EPP" ["Structure and properties of constructional low-alloyed titanium-based alloys obtained by EPP method"], *Suchasna Elektrometallurgiya – Electrometallurgy Today*, vol. 4, pp. 7-15, 2020. doi: 10.37434/sem2020.04.02. (Ukr.)
- [12] V.I. Shvets, O.V. Didkovskiy, Ye.V. Antipin, I.V. Zyakhov, L.M. Kapitanchuk, and Wang Qichen, "Features of microstructure of butt joints of hypereutectoid Areal-136HE-X rail steel in flash-butt

- welding,” *The Paton Welding Journal*, vol. 3, pp. 34-40, 2022. doi: 10.37434/tpwj2022.03.04.
- [13] O.I. Babachenko, K.H. D’omina, H.A. Kononenko, Zh.A. Dement’yeva, R.V. Podol’s’kyy, and O.A. Safironova, “Vplyv shvydkosti okholodzhennia bezperervnolytoi zahotovky, shcho tverdne, na parametry dendrynoi struktury vuhletsevoi stali z 0,54 % C” [“Effect of cooling rate of continuously cast solidifying billet on dendritic structure parameters of carbon steel with 0.54% C”], *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii – Metallophysics and Advanced Technologies*, vol. 43, no. 11, pp. 1537-1551, 2021. doi: 10.15407/mfint.43.11.1537. (Ukr.)
- [14] W. Tillmann, A. Eilers, and T. Henning, “Vacuum brazing and heat treatment of NiTi shape memory alloys,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1147, article 012025, 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1147/1/012025.
- [15] S.V. Akhnoin, V.Yu. Bilous, R.V. Selin, E.L. Vrzhyzhevskiy, I.K. Petrychenko, and S.L. Antonyuk, “Vplyv termichnoi obrobky na strukturu ta vlastyvoli zvarnykh ziednan vysokomitsnykh tytanovykh splaviv na osnovi β -fazy” [“Effect of heat treatment on the structure and properties of welded joints of high-strength β -phase titanium alloys”], *Suchasna Elektrometallurgiya – Electrometallurgy Today*, vol. 4, pp. 51-58, 2021. doi: 10.37434/sem2021.04.08. (Ukr.)
- [16] V.M. Nesterenkov, V.V. Skryabinsky, and M.O. Rusnyk, “Effect of thermal cycles in electron beam welding of aluminum 1570 alloy on mechanical properties of welded joints,” *The Paton Welding Journal*, vol. 5, pp. 40-45, 2021. doi: 10.37434/as2021.05.06.

Стаття надійшла 20.07.2025

Стаття прийнята 04.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Лаврик В. П., Суглобов В. В., Шишкін В. В. Оптимальні методи відновлення і зміцнення кернів клещевих захватів колодязних кранів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 57-64. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344644>.

УДК 621.91.02

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344648

ЛІНІЙНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗГОРТАННЯ ОТВОРУ
ВТУЛКИ ЗУБЧАСТОГО РЕДУКТОРА

Попов С.В.

канд. техн. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-152X>, e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua

Розглядається задача оптимізації режимів різання під час розгортання отворів у втулках зубчастих редукторів. Відмічено, що точність та якість обробки суттєво залежать від правильно визначених параметрів швидкості різання та подачі. Вони впливають на продуктивність та стійкість різального інструменту. Запропоновано математичну модель процесу розгортання з урахуванням технічних обмежень металорізального верстату та інструменту. Сформульовано критерій оптимальності, запропоновано систему нерівностей. Використання методу лінійної оптимізації дозволило визначити оптимальні режими, що забезпечують максимальну продуктивність зі збереженням необхідної якості обробки.

Ключові слова: різальний інструмент, розгортання, втулка, допуск, припуск, частота обертання, подача, глибина різання, шорсткість поверхні, якість обробки.

Постановка проблеми

В конструкціях зубчастих редукторів деталі типу «втулка» мають важливе значення. Саме вони забезпечують надійну посадку валів, підшипників, а також зубчастих коліс. Окрім того, дозволяють компенсувати знос та спрощують ремонтні операції. Застосування втулок підвищує ремонтпридатність та довговічність редуктора. Під час пошкодження внутрішньої поверхні втулку можливо замінити без виготовлення нового корпусу або валу.

Якість внутрішніх отворів втулок має першочергове значення. Від їх точності залежить надійність з'єднання із валом, відсутність люфтів, а також зносо-стійкість вузла.

Обробка внутрішніх поверхонь втулок зазвичай виконується за декілька етапів. На першому етапі отвір отримується свердлінням. Формується необхідний діаметр із визначеним припуском. Потім виконується zenkerування. Воно уточнює форму отвору та зменшує шорсткість поверхні. При цьому залишається незначний припуск під наступний етап обробки. Фінальною операцією є розгортання. Воно забезпечує високу точність розмірів, чистоту поверхні.

Саме розгортання надає можливість отримати отвори високого квалітету. Це особливо важливо для посадок під підшипники або вали із мінімальними значеннями допусків.

Основною проблемою під час виготовлення втулок для зубчастих редукторів є пошук оптимальних режимів обробки розгортанням. Правильна швидкість різання, подача, глибина суттєво впливають на точність отвору, шорсткість, а також стійкість різального інструменту.

Хибне поєднання цих параметрів може призвести до передчасного зносу інструменту, зниження продуктивності, погіршення якості посадки [1, 2]. Тому визначення оптимальних режимів розгортання стає особливо актуальним у сучасному машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розгортання посідає особливе місце серед операцій обробки отворів, тому що виконується на заключному етапі. Воно забезпечує остаточні розміри із високим квалітетом та мінімальною шорсткістю. При цьому вибір режимів різання має вирішальне значення на кінцевий результат. Завищене значення швидкості може викликати вібрації, припалювання на поверхні, прискорений знос. Завищена подача – збільшення шорсткості та зменшення точності. Неправильна глибина різання – поява задирок та брак деталі. Враховуючи те, що на процес розгортання впливають не тільки режимні параметри, але й матеріал заготовки, конструкція різального інструменту, застосування змащувально-охолоджувальної рідини, жорсткість технологічної системи, задачу пошуку оптимальних режимів різання намагається вирішити чимало кількості дослідників. Оптимізації процесів механічної обробки присвячено чимало праць і вітчизняних, і закордонних дослідників. Кожна із них має певну специфіку.

Зокрема автори [3] розглянули вплив конструктивних особливостей інструмента та режимів різання на його стійкість та продуктивність. Доведено ефективність використання пристроїв зі змінним вильотом інструмента та механізмів вібраційного свердління. Застосування таких рішень дозволяє, на їх думку, підвищити якість обробки та зняти обмеження, пов'язані із жорсткістю та міцністю інструмента.

У статті [4] проведено оптимізацію режимів різання на важких верстатах. Враховано конструктивні обмеження обладнання та інструмента. Пропонуються критерії оптимальності на основі приведених витрат, собівартості, продуктивності технологічного процесу. Визначено, що середній фактичний період стійкості має випадковий характер, підпорядковується закону Вейбулла. Застосування оптимальних режимів різання підвищує ефективність металообробки та забезпечує стабільність технологічного процесу.

Способи підвищення ефективності процесів механічної обробки за умов гнучкого автоматизованого виробництва розглянуто в статті [5]. Пропонується

інтегральний критерій для оцінювання ефективності технологічних систем – «інтенсивність формоутворення». Проведено аналіз ефективності застосування комбінованих осевих інструментів, а також багаторізових державок. Наведено результати експериментальних досліджень. Використання багаторізових накладок дозволяє підвищити продуктивність, зменшити трудомісткість. Підтверджено доцільність концентрації технологічних переходів як ефективного напрямку інтенсифікації виробничих процесів.

Задача оптимізації процесів виготовлення отворів із використанням методу пошуку заборон вирішена в [6]. Акцентується увага на зменшенні ручного маркування, простою обладнання, а також додаткових витрат часу. Запропонований алгоритм дозволяє одночасно враховувати послідовність та швидкість обробки для мінімізації загальних виробничих витрат. Отримані результати підтвердили ефективність підходу.

В роботі [7] досліджується вплив технологічних параметрів на якість отворів після розгортання. Проаналізовано вплив швидкості різання, подачі та ексцентриситету інструмента на циліндричність, шорсткість, діаметр отвору. Метод планування експерименту дозволив виявити вагомі фактори. Основний вплив має подача та швидкість різання.

Математична модель обробки отворів та типова структура автоматизованого проектування технологічних операцій подана авторами [8]. Розглянуто підхід до оптимального керування. Подача інструменту виступає як керуючий параметр, а сила різання – змінна, що контролюється. Розроблено алгоритми визначення параметрів-регуляторів, побудовано блок-схему автоматизованого процесу. Отримані результати впливають на підвищення ефективності, точності та надійності обробки.

У статті [9] розглянуто проблему оптимізації послідовного виконання операцій обробки отворів з урахуванням часу холостого ходу інструменту та часу переналагодження. Запропоновано математичну модель на основі динамічного програмування. Вона дозволяє визначити оптимальні рішення. Проведено порівняння із іншими методами та алгоритмами. Результати рекомендовані для підвищення продуктивності мехобробки та планування виробництва.

Отже, проведений аналіз засвідчив актуальність задачі оптимізації процесів обробки отворів, зокрема під час розгортання, де якість та точність суттєво залежать від режимів різання. Пошук оптимальних параметрів подачі та швидкості є необхідною умовою, яка забезпечить стабільність технологічного процесу, підвищення рівня продуктивності, зниження витрат.

Мета статті

Метою статті є аналіз впливу параметрів режиму розгортання отвору в деталі типу «втулка», що застосовується в конструкціях редукторів, а також визначення оптимальних значень частоти обертання

(швидкості), подачі, що забезпечать отримання отвору необхідної якості за умов раціонального використання різального інструменту.

Для цього необхідно виконати наступні завдання:

- 1) розробити математичну модель процесу розгортання з урахуванням основних технічних обмежень;
- 2) визначити критерій оптимальності;
- 3) сформулювати систему обмежень у вигляді нерівностей, що описують реальні технічні умови роботи металорізального верстату та інструменту;
- 4) провести визначення режимів різання, застосувавши метод лінійної оптимізації, які забезпечать максимальне значення продуктивності обробки за належного рівня якості.

Виклад основного матеріалу

На побудові математичних моделей заснована оптимізація технологічних процесів, а також режимів різання. Для того, щоб встановити математичну модель, необхідно виділити технічні обмеження. Саме вони значною мірою визначатимуть описуваний процес разом із критерієм оптимальності (функція оцінки). Призначення технічних обмежень залежить від конкретної обробки, а також визначається певними умовами технологічного, конструкційного, а також організаційно-виробничого характеру. Незважаючи на це, існує можливість виокремити ряд найважливіших технічних обмежень, що складуть основу математичної моделі процесу різання. Такими обмеженнями можуть бути: різальні властивості інструменту, визначені стійкістю; потужність електричного двигуна приводу головного руху; частота обертання шпинделя, подача, що зазначені у паспорті на верстат; жорсткість та міцність різального інструменту; точність процесу обробки; шорсткість поверхні після обробки.

Оціночною функцією приймемо мінімальну собівартість. Оптимізацію здійснюватимемо за двома параметрами, а саме, частотою обертання n , об/хв, та подачею S , мм/об. Технічні обмеження будуються за відомими залежностями. Вони приводяться до лінійного вигляду. Подаються у вигляді системи нерівностей. Саме у поєднанні з функцією оцінки нададуть математичну модель різання металу. Вивчення ж оптимальних режимів обробки, якими є частота обертання та подача, за математичною моделлю може бути реалізовано як аналітично, так і графічно. На підставі написаного вище визначимо оптимальні режими різання під час розгортання отвору $\varnothing 14H9^{(+0,043)}$ мм втулки зі сталі 45, що входить до складу циліндричного редуктора. Різальним інструментом є розгортка кінцева зі швидкохідної сталі Р6М5.

Перше обмеження, що враховує різальні можливості розгортки. З одного боку воно встановлює взаємозв'язок між лінійною швидкістю, що залежить від періоду стійкості інструменту, геометричними параметрами, глибиною різання, величиною подачі, механічними властивостями матеріалу, що зазнає обробки, та

з іншого – швидкістю різання, що визначається кінематикою верстата.

Як відомо, швидкість різання, V , м/хв, а також складові її рівняння визначаються відповідно до [10]:

$$V = \frac{C_V \cdot D^q}{T^m \cdot X \cdot S^Y} \cdot K_V, \quad (1)$$

де C_V , X , Y , q – коефіцієнти властивостей оброблюваного матеріалу, матеріалу різального інструменту, а також інші фактори, 10,5; 0,2; 0,65; 0,3;

D – діаметр інструменту, мм, 14;

T – період стійкості інструмента, хв, 40;

m – показник відносної стійкості. Він залежить від матеріалу як деталі, так і інструменту, товщини зрізаного шару, виду, умов обробки, 0,4;

t – глибина різання, мм, 0,1;

S – подача, мм/об;

K_V – коефіцієнт поправки:

$$K_V = K_{mV} \cdot K_{IV} \cdot K_{IV}, \quad (2)$$

де K_{mV} – коефіцієнт якості обробленого матеріалу, впливу його фізико-механічних властивостей на швидкість різання, 1,52;

K_{IV} – коефіцієнт властивостей матеріалу інструменту, 1;

K_{IV} – коефіцієнт глибини обробки, 1.

З іншого боку, значення швидкості може бути визначено із урахуванням кінематики металорізального верстату моделі MAST Metalltechnik M-KBM 50:

$$V = (\pi \cdot D \cdot n) / 1000, \quad (3)$$

де D – діаметр обробки, мм;

n – частота обертання шпинделя, об/хв.

Прирівняємо праві частини виразів (1) та (3). Виконавши перетворення отримаємо нерівність першого технічного обмеження:

$$n \cdot S^{0,65} \leq \frac{10,5 \cdot 14^{0,3} \cdot 1,52}{40^{0,4} \cdot 0,1^{0,2} \cdot \pi \cdot 0,014}. \quad (4)$$

Для вибору оптимальних значень режимів різання, застосовуючи метод лінійної оптимізації, усі технічні обмеження, а також функція оцінки приводяться до лінійного вигляду логарифмуванням, тобто маємо:

$$\ln n + 0,65 \ln S \leq \ln \frac{10,5 \cdot 14^{0,3} \cdot 1,52}{40^{0,4} \cdot 0,1^{0,2} \cdot \pi \cdot 0,014}. \quad (5)$$

Приймемо позначення: $x_1 = \ln n$; $x_2 = \ln S$, а $b_1 = \ln \frac{10,5 \cdot 14^{0,3} \cdot 1,52}{40^{0,4} \cdot 0,1^{0,2} \cdot \pi \cdot 0,014}$.

Отримуємо перше технічне обмеження:

$$x_1 + 0,65x_2 \leq b_1; \quad (6)$$

$$b_1 = 5,67.$$

Друге обмеження, що враховує потужність електричного двигуна приводу головного руху верстату. Тут встановлюється взаємозв'язок ефективної потужності, що витрачається на процес розгортання із потужністю електричного приводу головного руху металорізального верстату.

Ефективне значення потужності різання, N_e , кВт, при розгортанні визначається відповідно до [10]:

$$N_e = \frac{M_{кр} \cdot n}{9750}, \quad (7)$$

де $M_{кр}$ – крутний момент, якщо розглядати кожен зубець як розточувальний різець, Н·м:

$$M_{кр} = \frac{C_p \cdot t^X \cdot (\frac{S}{Z})^Y \cdot D}{2 \cdot 100}, \quad (8)$$

де C_p , X , Y – коефіцієнт та показники ступеня, 200; 1,0; 0,75;

Z – число зубців розгортки, 8.

Дивлячись на необхідні умови обробки, можна записати нерівність:

$$N_{ef} \leq N_n \cdot \eta, \quad (9)$$

де N_n – потужність електричного двигуна головного приводу верстату, кВт, 3,0;

η – коефіцієнт корисної дії кінематичного ланцюга від електричного двигуна до різального інструмента, 0,8.

Прирівнявши знову праві частини виразів (7) і (9), матимемо друге технічне обмеження:

$$n \cdot S^Y \leq \frac{1,95 \cdot 10^6 \cdot N_n \cdot \eta \cdot Z^Y}{C_p \cdot t^X \cdot D}; \quad (10)$$

$$n \cdot S^{0,75} \leq \frac{1,95 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 0,8 \cdot 8^{0,75}}{200 \cdot 0,1^{1,0} \cdot 14}.$$

Лінійний вид нерівності (10):

$$x_1 + 0,75x_2 \leq b_2; \quad (11)$$

$$b_2 = 11,28.$$

Третє обмеження враховує мінімальну допустиму частоту обертання шпинделя:

$$n_{B \min} \leq n. \quad (12)$$

Четверте обмеження враховує максимально допустиму частоту обертання шпинделя:

$$n_{B \max} \geq n. \quad (13)$$

Враховуючи технічну характеристику металорізального верстату моделі MAST Metalltechnik M-KBM 50 маємо, що $n_{B \min} = 31,5$ об/хв, $n_{B \max} = 1400$ об/хв.

Тоді маємо наступне:

$$b_3 \leq x_1, \quad (14)$$

де $b_3 = \ln 31,5 = 3,45$;

$$b_4 \geq x_1, \quad (15)$$

де $b_4 = \ln 1400 = 7,24$.

П'яте обмеження враховує мінімальну допустиму подачу:

$$S_{B \min} \leq S. \quad (16)$$

Шосте обмеження враховує максимально допустиму подачу:

$$S_{в max} \geq S. \quad (17)$$

Враховуючи технічну характеристику металорізального верстату та умови обробки маємо, що $S_{в min} = 0,056$ мм/об, $S_{в max} = 0,9$ мм/об.

Тоді маємо наступне:

$$b_5 \leq x_2, \quad (18)$$

де $b_5 = \ln 0,056 = -2,89$;

$$b_6 \geq x_2, \quad (19)$$

де $b_6 = \ln 0,9 = -0,11$.

Окрім того, до технічних обмежень (подано нижче) до моделі вносимо функцію оцінки F_0 :

$$\begin{cases} x_1 + 0,65x_2 \leq 5,67; \\ x_1 + 0,75x_2 \leq 11,28; \\ x_1 \geq 3,45; \\ x_1 \leq 7,24; \\ x_2 \geq -2,89; \\ x_2 \leq -0,11; \\ F = x_1 + x_2 \rightarrow \max. \end{cases} \quad (20)$$

Вирішуємо систему графічно (рис.). Отримаємо результат, зображений на рис.

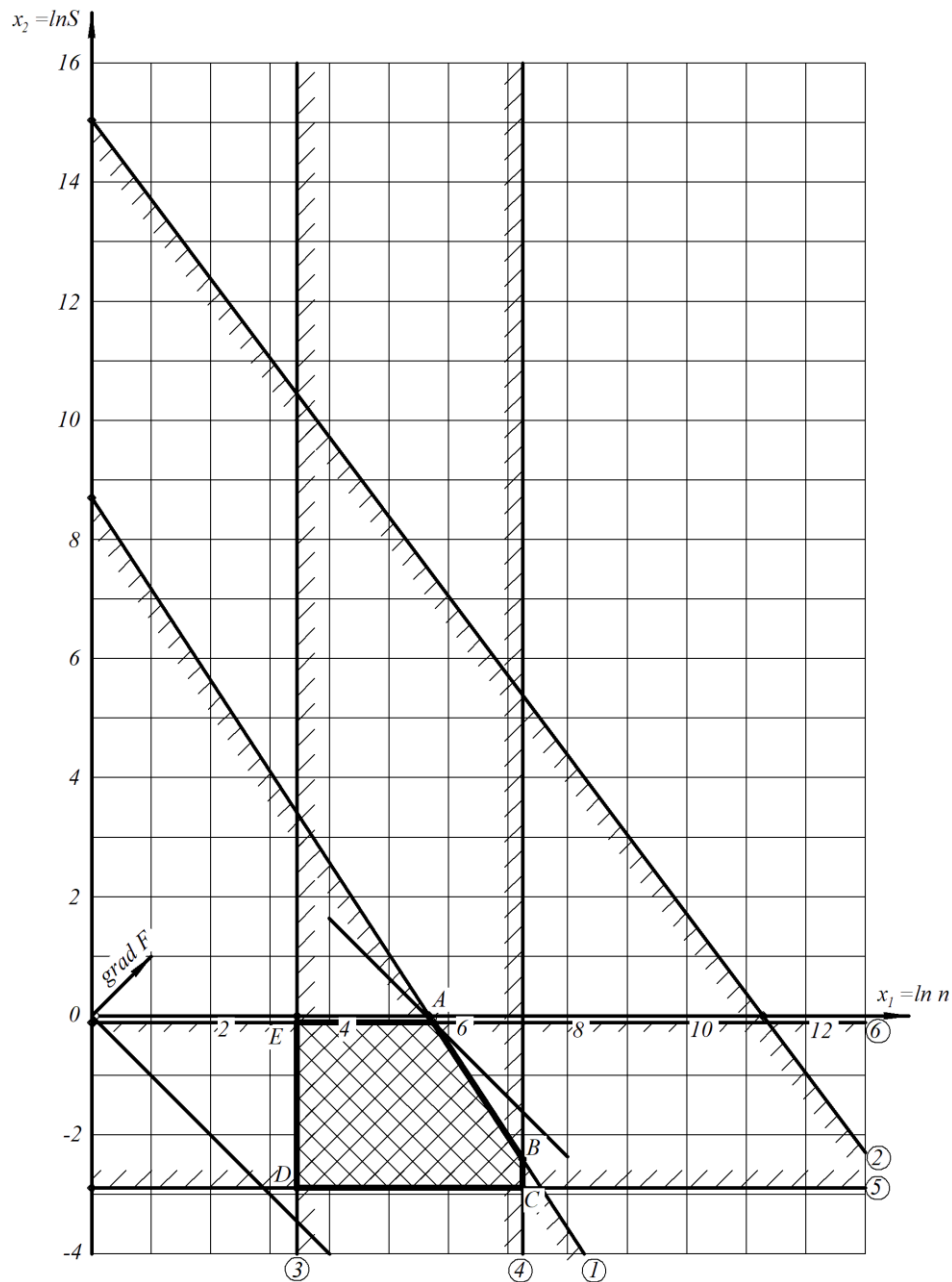


Рис. – Графічний розв'язок математичної моделі розгортання отвору втулки

Екстремальне значення функції оцінки забезпечується саме для x_1 , а також x_2 , що знаходяться в точці. Вона повинна лежати на одній із граничних прямих ліній чи їх перетині. Завдання пошуку оптимальних значень для x_1 , а також x_2 полягає у послідовному визначенні координат усіх можливих точок перетину граничних прямих, а також подальшого визначення для них значення максимальної суми. Оптимальні режими розгортання визначаються після визначення оптимальних координат. Для розв'язку завдання, що задано системою лінійних нерівностей та рівнянь, переважно використовується метод перебору точок, які утворюють багатокутник із можливими рішеннями. Відбувається попарне визначення точок перетину прямих, потім представляються їх координати до нерівностей системи (20). Точка із координатами, що задовольняє усім прямим і одночасна сума яких дає максимальне значення, – точка оптимуму.

Кожне із шести обмежень було представлено граничною прямою, що визначає півплощину. Саме у ній можливе існування рішень наведеної системи. Граничні прямі утворили під час перетину багатокутника розв'язків ABCDE (рис.). Всередині цього багатокутника будь-яка точка відповідатиме усім нерівностям системи (20). Саме в т. А функція приймає максимальне значення. Тобто маємо т. А (5,74; -0,11). На підставі цього визначаємо оптимальне значення режимних параметрів розгортання для частоти обертання n , об/хв, а також подачі S , мм/об:

$$n_{\text{опт}} = \exp(5,74) = 311 \text{ об/хв}, \quad (21)$$

$$S_{\text{опт}} = \exp(-0,11) = 0,9 \text{ мм/об}. \quad (22)$$

Висновки

Під час дослідження було розроблено математичну модель процесу розгортання отвору $\varnothing 14\text{H}9^{(+0,043)}$ мм у втулці зі сталі 45 циліндричного редуктора. Використано кінцеву розгортку зі швидкорізальної сталі Р6М5. Враховано основні технічні обмеження, що визначають реальні умови обробки верстату моделі MAST Metalltechnik M-KBM 50. До складу обмежень увійшли: швидкість; потужність; частота обертання; подача. Критерієм оптимальності визначено максимальну продуктивність обробки, що узгоджується із сучасними тенденціями одночасного збереження необхідного рівня якості. Сформульована система обмежень у вигляді нерівностей. Вони описують взаємозв'язки між технологічними параметрами обробки і технологічними характеристиками верстату та різального інструменту. Завдяки цьому отримана математична модель наближена до умов реального машинобудівного виробництва, що й забезпечує її можливість практичного застосування. Визначення оптимальних режимів різання реалізовано на підставі методу лінійної оптимізації (графічний спосіб). Це дозволило нам відобразити область допустимих розв'язків у вигляді багатокутника, що обмежений граничними

прямими. Останні відповідають технічним умовам процесу.

Визначені оптимальні значення частоти обертання шпинделя та подачі (311 об/хв та 0,9 мм/об) забезпечать досягнення екстремального значення функції оцінки (максимальна продуктивність обробки). Отримані результати підтвердили ефективність математичного моделювання для оптимізації технологічного процесу обробки різанням, що відкриває подальші перспективи його використання у виробничій практиці для підвищення економічної ефективності та конкурентоспроможності підприємств машинобудування.

Перелік використаних джерел

- [1] Попов С. В. Дослідження точності оброблення циліндра різцем із твердого сплаву. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Вип. 15, том 1. С. 105-113. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-12>.
- [2] Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / Фролов Є. А., Кравченко С. І., Попов С. В., Гнітько С. М. Полтава: НУПП, 2019. 204 с.
- [3] Пестунов В. М., Свяцький В. В., Придворова С. В. Оптимізація процесу обробки глибоких отворів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Серія: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25, ч. 1. С. 200-210.
- [4] Оптимізація режимів різання на важких верстатах / Г. П. Клименко та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Технології в машинобудуванні. 2022. № 2(6). С. 43-48. DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2\(6\).06](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2(6).06).
- [5] Карпусь В. Є., Іванова М. С., Котляр О. В. Інтенсифікація процесів механічної обробки у машинобудуванні. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. 2010. Вип. 1 (15). С. 29-34.
- [6] Waghmare G. H., Mohan R. Optimization of hole-making operations. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2014. Vol. 3, No. 4. Pp. 3079-3081.
- [7] Influence of selected technological factors on the hole quality during reaming / Fulemova J., Kutlwaser J., Gombar M., Rehor J. *Intelligent Manufacturing & Automation: Proceedings of the 28th International DAAAM Symposium, Zadar, Croatia, 08-11 November 2017*. Pp. 334-340. DOI: <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.046>.
- [8] Zubrzycki J., Świć A., Taranenko V. Mathematical model of the hole drilling process and typical automated process for designing hole drilling operations. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 282. Pp. 221-229. DOI:

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.282.221>.

- [9] Solimanpur M., Foroughi A., Mohammadi M. Optimum route selection in hole-making operations using a dynamic programming-based method. *Cogent Engineering*. 2016. Vol. 3, Iss. 1. Article 1201991. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1201991>.

- [10] Паливода Ю. Є., Дячун А. Є., Лещук Р. Я. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник. Тернопіль: ТНТУ, 2019. 240 с.

LINEAR OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF GEAR REDUCER BUSHING HOLE REAMING

Popov S.V.

PhD (Engineering), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-152X>, e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua

The article addresses the problem of optimizing the cutting parameters for the reaming of bushing holes in gear reducer assemblies. The quality and dimensional accuracy of internal holes are of critical importance, as they directly determine the reliability of shaft fits, wear resistance of assemblies, and overall durability of the mechanism. Reaming, being the final stage of machining, provides the required precision and surface finish. However, its efficiency strongly depends on correctly selected technological parameters such as spindle speed and feed rate. Improper combinations of these parameters may lead to premature tool wear, increased surface roughness, dimensional deviations and reduced process stability. To solve this problem, a mathematical model of the reaming process was developed with consideration of key technical limitations of the cutting tool and the machine tool, specifically the MAST Metalltechnik M-KBM 50. The model includes constraints related to cutting speed, spindle power, rotational frequency and feed per revolution. The optimization criterion was chosen as maximum machining productivity, which aligns with current industrial trends of increasing efficiency while maintaining the required quality standards. The system of constraints was formulated as inequalities describing the interaction between machining parameters and technological capabilities of the machine-tool system. The optimization task was solved using the linear optimization method in a graphical form. This approach made it possible to represent the feasible solution region as a polygon bounded by limiting lines corresponding to technical restrictions. The optimum point was determined at the intersection of the boundary lines, yielding optimal cutting parameters of 311 rpm spindle speed and 0.9 mm/rev feed rate. These parameters ensure the maximum value of the objective function, i.e., maximum machining productivity, while meeting quality requirements. The obtained results confirm the effectiveness of mathematical modeling in solving practical machining problems, as well as the potential of linear optimization methods for improving process planning in modern mechanical engineering. The proposed approach provides a reliable basis for increasing the economic efficiency and competitiveness of manufacturing enterprises.

Keywords: cutting tool, reaming, bushing, tolerance, machining allowance, spindle speed, feed rate, depth of cut, surface roughness, machining quality.

References

- [1] S.V. Popov, "Doslidzhennia tochnosti obroblennia tsylindra riztsem iz tverdoho splavu" ["Research on the accuracy of cylinder machining with a hard alloy tool"], *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific bulletin of the Tavsia State Agrotechnological University*, vol. 15, no. 1, pp. 105-113, 2025. doi: **10.32782/2220-8674-2025-25-1-12**. (Ukr.)
- [2] Ye.A. Frolov, S.I. Kravchenko, S.V. Popov, and S.M. Hnitko, *Tekhnolohichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannia: monohrafiia* [Technological support of product quality in mechanical engineering: Monograph]. Poltava, Ukraine: NUPP Publ., 2019. (Ukr.)
- [3] V.M. Pestunov, V.V. Sviatskyi, and S.V. Prydvorova, "Optymizatsiia protsesu obrobky hlybokyykh otvoriv" ["Optimization of deep hole machining process"], *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific papers of Kirovograd National Technical University. Series: Technology in agricultural production, industrial mechanical engineering, automation*, no. 25, vol. 1, pp. 200-210, 2012. (Ukr.)
- [4] H.P. Klymenko, V.D. Kovalov, Ya.V. Vasylenko, M.V. Shapovalov, and A.Yu. Shcherbakova, "Optymizatsiia rezhymiv rizannia na vazhkykh verstatakh" ["Optimization of cutting modes on heavy machines"], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National technical university «Kharkiv Polytechnic Institute». Series: Techniques in a machine industry*, no. 2(6), pp. 43-48, 2022. doi: **10.20998/2079-004X.2022.2(6).06**. (Ukr.)

- [5] V. Ye. Karpus, M.S. Ivanova, and O.V. Kotliar, "Intensyfikatsiia protsesiv mekhanichnoi obrobky u mashynobuduvanni" ["Intensification of machining processes in mechanical engineering"], *Zbirnyk naukovykh prats Akademii vnutrishnikh viisk MVS Ukrainy – Collection of scientific works of the Academy of Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine*, no. 1(15), pp. 29-34, 2010. (Ukr.)
- [6] G. H. Waghmare, and R. Mohan, "Optimization of hole-making operations," *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 3079-3081, 2014.
- [7] J. Fulemova, J. Kutlwaser, M. Gombar, and J. Rehor, "Influence of selected technological factors on the hole quality during reaming," in *Proceedings of the 28th International DAAAM Symposium «Intelligent Manufacturing & Automation»*, Zadar, Croatia, Nov. 08-11, 2017, pp. 334-340. doi: 10.2507/28th.daaam.proceedings.046.
- [8] J. Zubrzycki, A. Świć, and V. Taranenko, "Mathematical model of the hole drilling process and typical automated process for designing hole drilling operations," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 282, pp. 221-229, 2013. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.282.221.
- [9] M. Solimanpur, A. Foroughi, and M. Mohammadi, "Optimum route selection in hole-making operations using a dynamic programming-based method," *Cogent Engineering*, vol. 3, no. 1, article 1201991, 2016. doi: 10.1080/23311916.2016.1201991.
- [10] Yu. Ye. Palyvoda, A. Ye. Diachun, and R. Ya. Leshchuk, *Instrumentalni materialy, rezhymy rizannia, tekhnichne normuvannia mekhanichnoi obrobky: navchalno-metodychnyi posibnyk* [Tool materials, cutting modes, technical standardization of machining: Educational and methodological manual]. Ternopil, Ukraine: TNTU, 2019. (Ukr.)
- Стаття надійшла 13.09.2025
Стаття прийнята 24.09.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Попов С. В. Лінійна оптимізація технологічних параметрів розгортання отвору втулки зубчастого редуктора. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 65-71. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344648>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ
НА ЕФЕКТИВНІСТЬ КАЛІБРУВАННЯ НАСІННЯ У ПНЕВМОСЕПАРАТОРІ

Вовк В.О.

аспірант, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID:
<https://orcid.org/0009-0004-5530-1115>, e-mail: viacheslav.vovk@pdau.edu.ua

Подано результати теоретичного та експериментального дослідження впливу параметрів повітряного потоку на ефективність калібрування насіння у пневмосепараторі з осьовим вентилятором. Обґрунтовано необхідність стабілізації аеродинамічного поля у каналі за рахунок використання дифузора-вирівнювача та системи спрямовуючих лопатей. Проведено дослідження для насіння пшениці м'якої (вологість $12 \pm 0,5\%$, маса 1000 насінин 35-40 г) із застосуванням повного факторного експерименту 3^3 . Визначено вплив швидкості повітряного потоку (4,5-6,5 м/с) та товщини шару насіння (15-35 мм) на ефективність калібрування і питомі енерговитрати. Критерій зупинки експериментів встановлювався за стабілізацією показників протягом 5 хв, із трьома повтореннями кожного режиму ($n = 3$). Статистичну обробку результатів виконано методом ANOVA при $p < 0,05$. Отримано, що оптимальні умови калібрування досягаються за швидкості повітря 5,5-6,0 м/с і товщини шару 20-25 мм, при цьому відхилення швидкості по перерізу каналу не перевищує $\pm 10\%$. Удосконалена конструкція пневмосепаратора забезпечує підвищення ефективності калібрування на 12-15% та зменшення питомих енерговитрат на 10-12% порівняно з традиційними системами. Результати є валідними для насіння пшениці; для інших культур параметри швидкості та товщини шару потребують додаткового уточнення.

Ключові слова: пневмосепаратор, осьовий вентилятор, калібрування насіння, аеродинамічне розділення, рівномірність потоку, енергоефективність.

Постановка проблеми

У сучасному післязбиральному обробітку зернових та насінневих культур основною задачею є отримання високоякісного насіннєвого матеріалу шляхом відокремлення домішок та калібрування за фізичними властивостями (маса, розмір, форма). Одним із перспективних та широко використовуваних методів є пневмосепарація – тобто поділ суміші зерна та домішок у повітряному потоці. Перевагами таких систем є відносно простий пристрій, гнучкість у налаштуванні та можливість безконтактної обробки насіння [1].

Однак у реальних системах пневмосепарації виникає низка складностей, які суттєво обмежують ефективність та стабільність процесу. Розглянемо їх докладніше.

1. *Нерівномірність повітряного потоку по поперечному перерізу каналу.*

У реальних конструкціях каналів та вентиляційних систем часто спостерігаються значні локальні відхилення швидкості від середнього значення (в середині, біля стінок тощо). Це призводить до того, що деякі частинки з властивостями, близькими до граничних, можуть «не досягнути» потрібної аеродинамічної сили і залишитись у нижніх шарах або бути втраченими. Так, у пневморозділювачах із конічним каналом було виявлено, що нерівномірність розподілу швидкостей знижує точність класифікації частинок [1].

2. *Вплив геометрії каналу та конструктивних елементів.*

Форма каналу, звуження, розгалуження, нахили або введення додаткових елементів (наприклад, перегородок) можуть значно змінювати розподіл швидкості, утворювати завихрення, втрати тиску і бокові компоненти потоку. Наприклад, в роботах з обґрунтування конструкції пневморозділювачів показано, що

встановлення звужуючих перегородок у повітряних каналах із вертикальним потоком дозволяє покращити рівномірність розподілу повітряного потоку та підвищити продуктивність і ефективність очищення насіння [2]. Аналогічно, у моделі вертикального зигзаг-каналу показано, що компоненти геометрії (кут нахилу, довжина ділянок) суттєво впливають на траєкторії зерен та загальну ефективність сепарації [3].

3. *Обмеження, пов'язані з товщиною шару насіння та взаємодією частинок.*

Якщо шар насіння занадто густий, повітря не зможе належно проникнути до нижніх шарів, і частинки будуть «екранувати» одна одну, знижуючи ефективність розділення. Зі збільшенням концентрації матеріалу у повітряно-зерновій суміші збільшується взаємне екранування та зіткнення частинок, що погіршує розділення. У роботі з вертикальним зигзаг-каналом доведено, що з ростом завантаження і неправильним поділом шару знижується очистка і збільшується втрата якісного зерна [3].

4. *Енергетичні витрати та оптимальний баланс продуктивність/чистота.*

Для досягнення високої точності сепарації, часто доводиться підвищувати швидкість повітряного потоку, що призводить до зростання енергоспоживання. З енергетичної оцінки використання пневмосита встановлено, що питомі витрати енергії коливаються в діапазоні 0,9-1,6 кВт·год/т в залежності від конструкції і умов роботи [4]. Таким чином, існує конфлікт між високою ефективністю поділу і енергоефективністю.

5. *Недостатня кількість методик розрахунку для систем з осьовим вентилятором та вирівнювачами потоку.*

Більшість опублікованих робіт присвячена горизонтальним або конічним каналам, або ж традиційним

сепараторам. Менша кількість досліджень присвячена конструкціям з осьовим вентилятором у поєднанні з вирівнювачами потоку для стабілізації повітряного поля в каналі. У зв'язку з цим відсутні універсальні рекомендації з вибору швидкості, розміру каналу та конструктивних елементів, адаптованих під різні культури та умови.

Отже, актуальність теми полягає в необхідності розробки систематизованої, науково обґрунтованої методики підбору й оптимізації параметрів пневмосепаратора з осьовим вентилятором, враховуючи нерівномірність повітряного потоку, конструктивні особливості каналу та енергетичні аспекти. Це дозволить підвищити якість калібрування насіння, знизити втрати, мінімізувати енергозатрати і створити технологію, придатну для застосування в промислових післязбиральних лініях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У наукових роботах, присвячених аеродинамічному поділу зерна, підкреслюється важливість попереднього розшарування зернової суміші, контролю товщини шару та забезпечення рівномірності повітряного потоку у каналі сепарації [5-7]. Встановлено, що стабільність траєкторій руху частинок значною мірою залежить від однорідності швидкісного поля: відхилення швидкості повітря по поперечному перерізу каналу понад 20-30% призводить до суттєвого зниження точності калібрування, особливо у випадку фракцій із близькими значеннями питомої ваги [1, 3]. Дослідження, виконані методом CFD-моделювання, підтверджують, що наявність локальних зон зниженого тиску та турбулентних завихрень викликає нерівномірний розподіл повітряного потоку, що зменшує ефективність розділення на 10-15% [2, 8].

Процес розділення зернових сумішей у пневматичних каналах відбувається під дією сил тяжіння та аеродинамічної взаємодії частинок з потоком повітря [6]. Залежно від співвідношення цих сил, домішки з різною масою та формою змінюють свої траєкторії, частина з них виноситься у верхню зону потоку, а зерно основної культури рухається вниз по заданій траєкторії.

На ефективність процесу впливають кілька чинників: рівномірність повітряного потоку, спосіб подачі суміші, товщина шару, пористість зернового середовища, а також подібність аеродинамічних властивостей зерен і домішок [7-9].

Полідисперсність компонентів зернового матеріалу передбачає мінливість розмірів та щільності, для ідентифікації яких використовуються як стандартні вимірювання [10, 11], засновані на зважуванні об'єктів або вимірюванні їх каліброваними засобами, так і методи з використанням інтелектуальних систем, зокрема, нейронних мереж [12, 13].

У роботах [2, 4] відзначено, що раціональний підбір товщини шару насіння (зазвичай у межах 20-25 мм для пшениці) та контроль інтенсивності подачі

матеріалу забезпечують стійке формування зернового потоку і сприяють підвищенню селективності розділення. При цьому товстий шар створює ефект взаємного екранізування частинок і збільшує аеродинамічний опір, тоді як надто тонкий шар знижує продуктивність апарата.

Енергетичні оцінки, проведені для пневмосепараторів із замкненим контуром циркуляції повітря, показують, що питомі витрати енергії становлять у середньому 0,9-1,6 кВт·год/т, залежно від конструкції вентилятора, типу каналу та режимів подачі [4, 14].

Підвищення рівномірності повітряного потоку та оптимізація параметрів осьового вентилятора дозволяють зменшити енерговитрати на 10-12% без втрати ефективності сепарації.

Це свідчить про доцільність удосконалення конструкцій пневмосепараторів шляхом використання дифузоров-вирівнювачів та спрямовуючих лопатей, які стабілізують аеродинамічне поле у робочій зоні.

Мета статті

Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні впливу параметрів повітряного потоку, геометрії каналу та режимів подачі матеріалу на ефективність процесу калібрування насіння у пневмосепараторі з осьовим вентилятором, а також у розробці рекомендацій щодо вибору раціональних конструктивних і режимних параметрів для підвищення точності поділу та зниження енергетичних витрат.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- провести аналітичний огляд сучасних наукових праць, присвячених аеродинамічному розділенню зернових сумішей і конструкціям пневмосепараторів, зокрема з осьовими вентиляторами та вирівнювачами потоку;
- визначити основні чинники, що впливають на якість калібрування насіння – швидкість і рівномірність повітряного потоку, товщину шару, подачу матеріалу та геометрію каналу;
- обґрунтувати раціональні параметри вентиляційної системи, включно з характеристиками осьового вентилятора, дифузора-вирівнювача та системи спрямовуючих лопатей;
- провести експериментальні дослідження на лабораторній або дослідно-промисловій установці для визначення оптимальних режимів калібрування (швидкість повітря, товщина шару, подача насіння);
- оцінити енергетичну ефективність процесу пневмосепарації та встановити питомі витрати енергії залежно від режимних параметрів.
- порівняти отримані результати з існуючими технологічними схемами пневмосепараторів і сформулювати рекомендації для впровадження в промислових умовах.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження було насіння пшениці м'якої, очищене від грубих домішок. Вологість зерна становила $12 \pm 0,5\%$, маса 1000 насінин – 35-40 г, середній діаметр частинок – 3,5-4,0 мм, густина насіння – $\rho_p = 1250 \text{ кг/м}^3$. Дослідження проводили при температурі повітря $t = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ і тиску $p = 101,3 \text{ кПа}$.

Швидкість повітряного потоку в каналі змінювали зміною частоти обертання вентилятора за допомогою перетворювача частоти. Вимірювання швидкості здійснювали термоанемометром Testo 425 у 25 контрольних точках поперечного перерізу каналу (сітка 5×5) для визначення поля швидкостей та нерівномірності потоку. Перепад тиску вимірювали мікроанемометром ММН-240, температуру – цифровим термометром ТЕМП-100, густину повітря розраховували за стандартними залежностями з урахуванням атмосферних умов.

Для дослідження впливу основних факторів (швидкості повітря v , товщини шару h та рівномірності потоку) застосовано план повного факторного експерименту 3^3 з повторністю $n = 3$. Товщину шару насіння змінювали в межах 15-35 мм, швидкість потоку – 4,5-6,5 м/с. Якість калібрування оцінювали за показником ефективності розділення η , %, який визначали як відношення маси цільової фракції до загальної маси вибірки після сепарації. Енергетичні витрати обчислювали за показаннями лічильника активної енергії СЕ101.

Під час проведення експериментів критерій зупинки визначався за стабілізацією показників швидкості повітряного потоку та масового розподілу фракцій протягом не менше ніж 5 хвилин. Кожний режим

досліді повторювався тричі ($n = 3$), після чого обчислювалися середні значення параметрів. Для оцінки достовірності результатів розраховували середньоквадратичне відхилення ($\pm SD$) для ефективності калібрування η та питомих енерговитрат P . Статистичну обробку даних виконували методом ANOVA з рівнем значущості $p < 0,05$.

Отримані результати обробляли у програмному середовищі MS Excel та Statistica 12.0.

Виклад основного матеріалу

Пневмосепаратор, конструкцію якого досліджено в роботі, складається з осьового вентилятора, повітряного каналу із дифузором-вирівнювачем потоку, системи спрямовуючих лопатей, живильного бункера з дозатором, робочої камери для калібрування насіння та приймальних лотків для окремих фракцій.

Схема установки представлена на рис. 1, де наведено основні вузли пневмосепаратора: канал, дифузор-вирівнювач, систему спрямовуючих лопатей та зони відбору фракцій. Повітря, що створюється осьовим вентилятором, подається у вертикальний канал, де формує рівномірний висхідний потік, який взаємодіє із зерновим шаром. Розділення відбувається внаслідок різниці в аеродинамічних властивостях частинок – насіння різної маси, форми та щільності потрапляє у зони з різною швидкістю потоку.

Розглянемо основні чинники, що впливають на процес пневмосепарації, з урахуванням повітряного потоку, швидкості та рівномірності потоку, а також товщини шару та енергетичних показників.

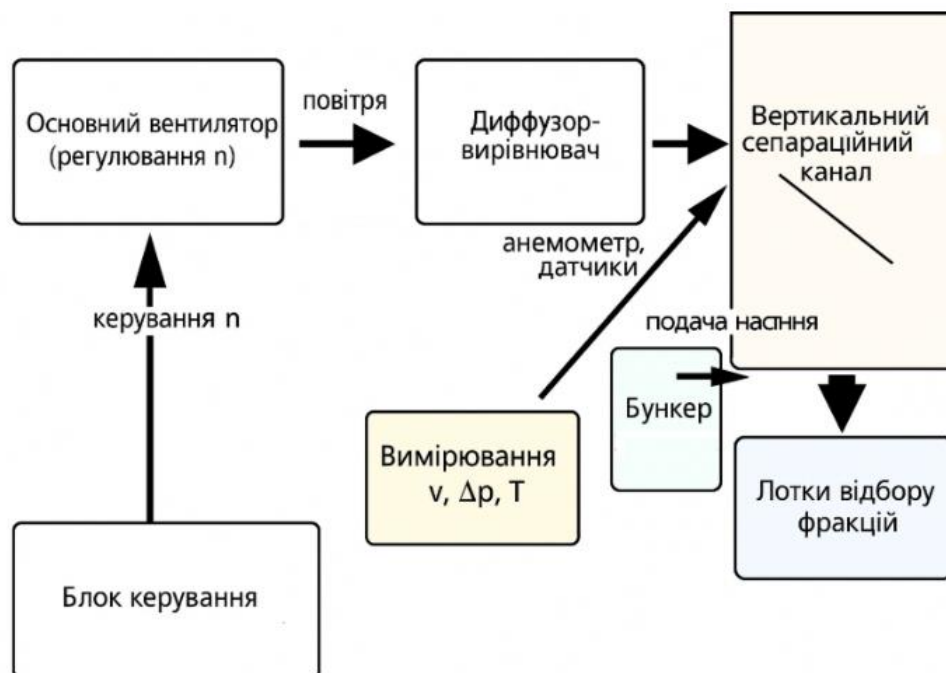


Рис. 1 – Схема експериментальної установки пневмосепаратора з осьовим вентилятором

1. *Теоретичне обґрунтування параметрів повітряного потоку.*

Для визначення умов ефективного поділу використано рівняння рівноваги частинки в повітряному потоці:

$$G = F_{aer} = C_x \frac{\rho v^2 A}{2},$$

де:

$G = mg$ – вага частинки, Н;

F_{aer} – аеродинамічна сила опору, Н;

C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору;

ρ – густина повітря, кг/м³;

v – швидкість повітря, м/с;

A – площа проекції частинки, м²;

Критична швидкість осідання насіння визначалась із рівняння рівноваги сил:

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{2mg}{C_x \rho A}}.$$

Експериментально встановлено, що для насіння пшениці м'якої середньої фракції (масою 35-40 мг) критична швидкість становить 5,4-5,8 м/с, для дрібної фракції – 4,8-5,2 м/с, а для важкої (повноцінного зерна) – 6,0-6,3 м/с.

2. Вплив швидкості та рівномірності потоку

Дослідження проводили на дослідному стенді із можливістю регулювання частоти обертання осьового вентилятора в межах 800-1800 об/хв, що відповідало швидкостям повітряного потоку 4-7 м/с. Вимірювання розподілу швидкостей по висоті та ширині каналу здійснювали термоанемометром Testo-425 у 25 контрольних точках.

Результати показали, що при відсутності дифузора та вирівнювальних лопатей відхилення швидкості по перерізу каналу досягало $\pm 28\%$, що спричиняло нерівномірне переміщення насіння та зниження точності поділу. Після встановлення дифузора-вирівнювача і системи лопатей відхилення зменшилося до $\pm 8-10\%$, а якість калібрування зросла на 12-15%.

3. Вплив товщини шару насіння

Експериментами визначено, що оптимальна товщина шару матеріалу становить 20-25 мм. Зі збільшенням шару до 35 мм ефективність поділу зменшувалася на 9-11 % через ефект екранізування зерен і нерівномірний розподіл повітря. При товщині шару менше 15 мм знижувалася продуктивність системи.

4. Енергетичні показники

Енергетичні витрати системи визначалися за споживанням електродвигуна осьового вентилятора потужністю 1,5 кВт. Встановлено, що при оптимальній швидкості потоку 5,5-6,0 м/с питомі енерговитрати становили 1,0-1,2 кВт·год/т, що на 10-12% менше порівняно з традиційними пневмосепараторами без стабілізації потоку.

Результати експериментальних досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1
Вплив параметрів повітряного потоку на ефективність калібрування насіння пшениці

№	v , м/с	h^* , мм	Δ^* , %	η^* , %	P^* , кВт·год/т
1	4,5	20	± 25	81	0,95
2	5,5	25	± 10	93	1,05
3	6,0	25	± 8	95	1,10
4	6,5	30	± 12	90	1,25

Примітка: h^* – товщина шару; Δ^* – відхилення швидкості по перерізу; η^* – ефективність калібрування; P^* – питомі енерговитрати

Отримані результати свідчать, що найвища ефективність калібрування (до 95%) досягається при швидкості повітря 5,5-6,0 м/с і товщині шару 20-25 мм, за умови вирівнювання потоку в каналі.

Для інших культур (ячмінь, овес, соя тощо) параметри швидкості повітряного потоку v та товщини шару h потребують окремого переналаштування з урахуванням їх аеродинамічних характеристик.

Розроблена схема пневмосепаратора з осьовим вентилятором, дифузоре-вирівнювачем і спрямовуючими лопатями забезпечує стабільний повітряний потік, високу якість поділу та зниження енергоспоживання.

Результати та їх обговорення

Результати експериментальних і теоретичних досліджень показали, що на ефективність процесу пневмосепарації насіння істотно впливають швидкість повітряного потоку, його рівномірність по поперечному перерізу каналу, товщина шару насіння та стабільність подачі матеріалу.

При зміні швидкості повітря від 4,5 до 6,0 м/с спостерігалася виражена нелінійна залежність ефективності калібрування від швидкості потоку. Максимальна ефективність досягалася в діапазоні 5,5-6,0 м/с, що відповідає критичній швидкості витання середньої фракції насіння пшениці. За цих умов забезпечується оптимальне співвідношення між аеродинамічною силою опору й силою тяжіння, завдяки чому легші частинки утримуються в повітряному потоці, а важчі осідають у нижній зоні каналу.

Визначено, що збільшення нерівномірності швидкісного поля понад $\pm 20\%$ по перерізу каналу призводить до зниження точності поділу на 10-15%, оскільки в потоці виникають турбулентні зони, що спотворюють траєкторії руху частинок. Встановлення дифузора-вирівнювача та спрямовуючих лопатей зменшило відхилення швидкості до $\pm 8-10\%$, що сприяло стабілізації розподілу частинок у потоці та підвищенню селективності розділення.

Оптимальна товщина шару насіння у робочій камері становила 20-25 мм. При збільшенні товщини

шару понад 30 мм спостерігалось взаємне екранізування зерен та локальне зниження швидкості повітряного потоку, що призводило до зменшення ефективності калібрування на 8-10%. Це пов'язано з тим, що нижні шари насіння отримують меншу аеродинамічну дію, а частинки втрачають можливість вільного переміщення у потоці.

Надто тонкий шар (< 15 мм) забезпечував високу точність поділу, проте знижував продуктивність апарата, оскільки об'єм оброблюваної маси зменшувався при сталих енергетичних витратах системи.

Енергетичні показники дослідженого пневмосепаратора з осьовим вентилятором також підтвердили доцільність використання вирівнювальних елементів. При оптимальних режимах ($v = 5,5-6,0$ м/с, $h = 25$ мм) питомі енерговитрати становили 1,0-1,2 кВт·год/т, що на 10-12% менше, ніж у традиційних системах без стабілізації потоку.

Отримані дані добре узгоджуються з результатами попередніх досліджень [1-3], де показано, що рівномірність повітряного поля та контроль товщини шару є ключовими чинниками ефективності пневмосепарації. Разом із тим, використання осьового вентилятора у поєднанні з дифуззором і спрямовуючими лопатями дало змогу забезпечити стабільність потоку при менших енерговитратах, що свідчить про перспективність удосконаленої конструкції.

Таким чином, встановлено, що оптимальні умови калібрування насіння пшениці досягаються за швидкості повітряного потоку 5,5-6,0 м/с, товщини шару 20-25 мм, та відхилення рівномірності потоку не більше $\pm 10\%$, що забезпечує ефективність калібрування до 95%.

Висновки

1. У результаті теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що ефективність калібрування насіння у пневмосепараторі визначається, насамперед, параметрами повітряного потоку: швидкістю, рівномірністю розподілу по перерізу каналу та товщиною шару насіння у робочій зоні.

2. Визначено критичні швидкості витання фракцій насіння пшениці: для легкої фракції – 4,8-5,2 м/с, середньої – 5,5-5,8 м/с, важкої – 6,0-6,3 м/с. Оптимальна швидкість повітряного потоку в робочому каналі становить 5,5-6,0 м/с, що забезпечує максимальну якість калібрування.

3. Удосконалена конструкція пневмосепаратора з осьовим вентилятором, дифуззором-вирівнювачем і системою спрямовуючих лопатей забезпечує підвищення рівномірності повітряного потоку (відхилення не більше $\pm 10\%$) та покращення ефективності калібрування на 12-15% у порівнянні з базовими аналогами.

4. Оптимальна товщина шару насіння у робочій камері становить 20-25 мм. Зі збільшенням шару понад 30 мм виникає ефект екранізування гальмування повітря, що знижує ефективність процесу до 85-87 %.

5. Енергетичні випробування показали, що питомі витрати електроенергії пневмосепаратора з осьовим вентилятором становлять 1,0-1,2 кВт·год/т, що на 10-12% менше порівняно з традиційними системами без вирівнювання потоку.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації енергоефективних пневмосепараторів для післязбиральної обробки зернових культур, а також при розробці автоматизованих систем керування процесом калібрування насіння.

Перелік використаних джерел

- [1] The effect of selected factors on separation efficiency in a pneumatic conical separator / D. J. Choszcz et al. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Article 3051. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12073051>.
- [2] Khamyev V., Gulyev A., Boiko A. Justification of the design of pneumatic sorting machine for the preparation of selection seeds. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. Article 05008. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405008>.
- [3] Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel / S. Stepanenko et al. *Journal of Central European Agriculture*. 2023. Vol. 24, no. 1. Pp. 225-235. DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>.
- [4] Energy Assessment of the Pneumatic Sieve Separator for Agricultural Crops / Y. Mykhailov et al. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2021. Vol. 25, no. 1. Pp. 147-155. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2021-0012>.
- [5] The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials / M. Panasiewicz et al. *Journal of Food Engineering*. 2012. Vol. 109, no. 3. Pp. 603-608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.033>.
- [6] Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream / Kroulík M., Hůla J., Rybka A., Honzík I. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 62, no. 2. Pp. 56-63. DOI: <https://doi.org/10.17221/32/2014-RAE>.
- [7] Kovalyshyn S., Dadak V., Konyk S. Intensification of the process of preparing small seed crop mixtures. *Acta Technologica Agriculturae*. 2015. Vol. 4. Pp. 108-112. DOI: <https://doi.org/10.1515/ata-2015-0021>.
- [8] Mathematical modelling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine / I. Badretdinov et al. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. Vol. 17, no. 4. Pp. 529-534. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes17-22640>.
- [9] Air flow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method / J. Lukaszuk et al. *Research in Agricultural Engineering*. 2008. Vol. 54, no. 2. Pp. 50-57. DOI: <https://doi.org/10.17221/8/2008-RAE>.
- [10] Mathematical models of geometric sizes of cereal crops' seeds as dependent random variables / Kuzminskyi R., Kovalyshyn S., Kovalchik Y.,

- Sheremeta R. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018. Vol. 3. Pp. 100-104. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0018>.
- [11] Research on sunflower seeds separation by airflow / E. Aliev et al. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 56. Pp. 119-128.
- [12] Prediction of Physical Parameters of Pumpkin Seeds Using Neural Network / Demir B., Eski I., Kus Z., Er-cisli S. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj Napoca*. 2017. Vol. 45. Pp. 22-27. DOI: <https://doi.org/10.15835/nbha45110429>.
- [13] Werby R. Performance cleaning unit for clover seeds affecting some physical and mechanical properties. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*. 2013. Vol. 4. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.21608/jssae.2013.50543>.
- [14] Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct / S. Kharchenko et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 10. Article 4383. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104383>.

STUDY OF THE INFLUENCE OF AIRFLOW PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF SEED CALIBRATION IN A PNEUMATIC SEPARATOR

Vovk V.O.

postgraduate student, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5530-1115>, e-mail: viacheslav.vovk@pdau.edu.ua

The paper presents the results of theoretical and experimental research on the effect of airflow parameters on the efficiency of seed calibration in a pneumatic separator equipped with an axial fan. The study substantiates the need to stabilize the aerodynamic field inside the separation channel by installing a diffuser-straightener and a system of guide vanes that equalize the velocity profile of the air stream and suppress local vortices. Experiments were performed on soft wheat seeds (moisture 12 ± 0.5 %, thousand-kernel weight 35–40 g) using a full factorial design 3^3 with three replications per mode and a stopping criterion based on 5-minute stabilization of key indicators. Airflow uniformity was quantified by multi-point velocity mapping across the channel cross-section; the improved design reduced velocity deviation from ± 28 % to within ± 10 %, which translated into a 12–15 % increase in calibration efficiency. The combined effects of airflow velocity (4.5–6.5 m/s) and seed-layer thickness (15–35 mm) on separation performance and specific energy consumption were analyzed using ANOVA ($p < 0.05$). Optimal operation was achieved at 5.5–6.0 m/s and a 20–25 mm seed layer, where specific energy consumption decreased by 10–12 % compared with conventional separators without flow stabilization. The proposed configuration ensures stable aerodynamic conditions, improves selectivity of particle trajectories, and enhances overall energy efficiency of post-harvest processing. While parameter values were validated for wheat, the methodology provides transferable guidelines for tuning airflow and layer thickness for other crops with different aerodynamic properties, supporting the development of automated, low-energy pneumatic grading systems for industrial seed-processing lines.

Keywords: pneumatic separator, axial fan, seed calibration, aerodynamic separation, flow uniformity, energy efficiency.

References

- [1] D.J. Choszcz, P.S. Reszczyński, E. Kolankowska, S. Konopka, and A. Lipiński, “The effect of selected factors on separation efficiency in a pneumatic conical separator,” *Sustainability*, vol. 12, article 3051, 2020. doi: [10.3390/su12073051](https://doi.org/10.3390/su12073051).
- [2] V. Khamyev, A. Gulyev, and A. Boiko, “Justification of the design of pneumatic sorting machine for the preparation of selection seeds,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 224, article 05008, 2018. doi: [10.1051/mateconf/201822405008](https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405008).
- [3] S. Stepanenko, B. Kotov, A. Kuzmych, R. Kalinichenko, and V. Hryshchenko, “Research of the process of air separation of grain material in a vertical zig-zag channel,” *Journal of Central European Agriculture*, vol. 24, no. 1, pp. 225-235, 2023. doi: [10.5513/JCEA01/24.1.3732](https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732).
- [4] Y. Mykhailov, V. Skrypnyk, A. Semenov, R. Kharak, and V. Serdyuk, “Energy assessment of the pneumatic sieve separator for agricultural crops,” *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 147-155, 2021. doi: [10.2478/agriceng-2021-0012](https://doi.org/10.2478/agriceng-2021-0012).
- [5] M. Panasiewicz, P. Sobczak, J. Mazur, K. Zawiślak, and D. Andrejko, “The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials,” *Journal of Food Engineering*, vol. 109, no. 3, pp. 603-608, 2012. doi: [10.1016/j.jfoodeng.2011.10.033](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.033).
- [6] M. Kroulík, J. Hůla, A. Rybka, and I. Honzík, “Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream,” *Research in Agricultural Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 56-63, 2016. doi: [10.17221/32/2014-RAE](https://doi.org/10.17221/32/2014-RAE).
- [7] S. Kovalyshyn, V. Dadak, and S. Konyk, “Intensification of the process of preparing small seed crop mixtures,” *Acta Technologica Agriculturae*, vol. 4, pp. 108-112, 2015. doi: [10.1515/ata-2015-0021](https://doi.org/10.1515/ata-2015-0021).
- [8] I. Badretdinov, S. Mudarisov, M. Tuktarov, E. Dick, S. Arslanbekova, “Mathematical modelling of the

- grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine,” *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 17, no. 4, pp. 529-534, 2019. **doi: 10.5937/jaes17-22640.**
- [9] J. Lukaszuk, M. Molenda, J. Horabik, B. Szot, and M. Montross, “Air flow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method,” *Research in Agricultural Engineering*, vol. 54, no. 2, pp. 50-57, 2008. **doi: 10.17221/8/2008-RAE.**
- [10] R. Kuzminskyi, S. Kovalishyn, Y. Kovalchuk, and R. Sheremeta, “Mathematical models of geometric sizes of cereal crops’ seeds as dependent random variables,” *Acta Technologica Agriculturae*, vol. 3, pp. 100-104, 2018. **doi: 10.2478/ata-2018-0018.**
- [11] E. Aliev, V. Yaropud, V. Dudin, V. Pryshliak, N. Pryshliak, and V. Ivlev, “Research on sunflower seeds separation by airflow,” *INMATEH Agricultural Engineering*, 2018, vol. 56, pp. 119-128, 2018.
- [12] B. Demir, I. Eski, Z. Kus, and S. Ercisli, “Prediction of Physical Parameters of Pumpkin Seeds Using Neural Network,” *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj Napoca*, vol. 45, pp. 22-27, 2017. **doi: 10.15835/nbha45110429.**
- [13] R. Werby, Performance cleaning unit for clover seeds affecting some physical and mechanical properties, *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, vol. 4, pp. 1-13, 2013. **doi: 10.21608/jssae.2013.50543.**
- [14] S. Kharchenko et al, “Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, article 4383, 2021. **doi: 10.3390/app11104383.**

Стаття надійшла 25.07.2025

Стаття прийнята 13.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Вовк В. О. Дослідження впливу параметрів повітряного потоку на ефективність калібрування насіння у пневмосепараторі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 72-78. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344653>.

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.162.16

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344658

ТЕРМОЗМІЦНЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ НА СТАЛЕВИХ ПЕРФОРОВАНИХ ПОДИНАХ

Чупринов Є.В.	канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8605-3434 , e-mail: itchupa@gmail.com ;
Кассім Д.О.	д-р техн. наук, професор, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1750-1237 , e-mail: kassim@duet.edu.ua ;
Зайцев Г.Л.	канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7909-9044 , e-mail: zaitsev@duet.edu.ua ;
Ляхова І.А.	канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7589-8351 , e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua ;
Малій Х.В.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9046-4268 , e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education

Розроблено, виготовлено та випробувано конструкцію жаростійких сталевих перфорованих піддонів і спосіб їх кріплення до випалювального візка, що дозволяє замінити колосники на конвеєрних машинах для термозміцнення залізорудних окатишів. Мета роботи – вдосконалення процесу виробництва окатишів шляхом зменшення витрати високолегованого металу, підвищення продуктивності обпалювальних машин і поліпшення металургійних характеристик обпалених окатишів. Завдання дослідження – обґрунтування можливості заміни колосників на обпалювальних візках конвеєрних машин, відпрацювання їх конструкції та кріплення на візках, відпрацювання технологічного процесу термозміцнення сирих окатишів. Виконані напівпромислові та промислові випробування показали працездатність прийнятих технічних рішень. Встановлено, що заміна колосників піддонами дозволить зменшити витрату високолегованого металу, підвищити продуктивність випалювальних машин і поліпшити металургійні характеристики випалених окатишів.

Ключові слова: термозміцнення окатишів, перфорована подина, колосникові ґрати, обпалювальна машина, залізорудна сировина, металургійні властивості, економія металу, газодинамічний опір, живий переріз, витрати легованої сталі.

Постановка проблеми

Проблема підвищення ефективності процесів термозміцнення залізорудних окатишів має важливе значення для сучасної чорної металургії, оскільки якість окатишів безпосередньо впливає на стабільність доменної плавки, витрати палива, продуктивність доменних печей та екологічні показники виробництва. Традиційні колосникові подини обпалювальних машин, виготовлені з жароміцних сталей, характеризуються великою масою і значною витратою легуючих елементів, що збільшує капітальні та експлуатаційні витрати. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на вирішення завдання щодо зниження витрати жароміцної сталі та поліпшення якості окатишів без будівництва нових цехів і закупівлі дорогого обладнання. Розробка і впровадження сталевих перфорованих подин замість колосників є технічно обґрунтованим напрямом модернізації обпалювальних агрегатів без необхідності їх капітальної реконструкції.

Виконане дослідження має комплексну науково-практичну цінність, оскільки поєднує конструктивні інновації з підвищенням ефективності виробництва,

енергозбереженням і раціональним використанням матеріальних ресурсів у галузі чорної металургії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасній науково-технічній літературі значна увага приділяється вдосконаленню процесів термозміцнення залізорудних окатишів, оскільки якість обпаленої сировини, зокрема окатишів, визначає ефективність доменної плавки.

Основні напрями досліджень стосуються оптимізації тепло- та масообмінних процесів у шарі окатишів, покращення газорозподілу через подини й колосникові решітки обпалювальних машин, підвищення довговічності жароміцних елементів конструкції та зниження енерговитрат виробництва.

Значний внесок у моделювання процесів обпалу зробили автори [1], які побудували математичну модель тепло- та масообміну під час випалу окатишів на прямій решітці, що дозволило оптимізувати температурний режим і швидкість газового потоку. Подальший розвиток цих моделей здійснили в роботі [2, 3], де врахували взаємодію теплових і хімічних реакцій

усередині шару та комплексно описали процеси тепло- та масопереносу. Результати цих робіт забезпечують теоретичну основу для підбору раціональних параметрів процесу термообробки.

Окрему групу становлять дослідження газодинаміки та рівномірності нагрівання шару окатишів за допомогою чисельного моделювання (CFD). В [4, 5] показано, що конфігурація газорозподільних отворів у решітці суттєво впливає на рівномірність потоку та стабільність температурного поля. З цими висновками корелюють результати досліджень [6-9], на підставі яких встановлено, що правильна геометрія отворів у подині сприяє покращенню охолодження та зменшенню енергоспоживання агрегатів.

Не менш актуальними залишаються питання довговічності матеріалів решіток і подин, які працюють в умовах агресивних фізичних та хімічних впливів [5, 10]. Отримані результати підкреслюють необхідність пошуку нових матеріалів із підвищеною стійкістю до утворення окалини та термоциклічного зношення.

Певні технічні рішення запропоновано в межах альтернативних технологій термозміцнення, зокрема у процесі «Steel Belt», розробленому компанією LKAB (Швеція) [11, 12]. Ця технологія базується на використанні жароміцної перфорованої сталеві стрічки замість традиційних колосників, що забезпечує зниження витрат металу та підвищення однорідності обпалення окатишів. Проте широке впровадження цього процесу обмежується складністю виготовлення стрічок великої ширини та високими капітальними витратами.

Аналіз останніх досліджень свідчить, що більшість досліджень орієнтовані на моделювання процесів і лабораторні експерименти, тоді як повномасштабні випробування перфорованих сталевих подин у промислових умовах висвітлено недостатньо. Недослідженими залишаються вплив форми й розмірів отворів на газопроникистость шару, умови утворення окалини при тривалій експлуатації та оптимальний вибір матеріалів подин з урахуванням їх термофізичних властивостей.

Отже попри значний прогрес у теоретичному та чисельному моделюванні, комплексні експериментальні дослідження конструкцій перфорованих подин залишаються актуальним науковим завданням. Їх результати мають важливе практичне значення для підвищення ефективності процесів термозміцнення, зменшення матеріалоемності обладнання та продовження ресурсу його роботи.

Мета статті

Огляд літературних джерел показав, що існує явна ніша для досліджень перфорованих сталевих подин як заміни традиційних колосників – особливо у частині довготривалої експлуатації, оптимізації геометрії отворів під конкретні умови та комплексної економічної оцінки. Завданням роботи є обґрунтування та

експериментальна перевірка ефективності використання сталевих перфорованих подин замість традиційних колосників у процесі термозміцнення залізорудних окатишів з метою підвищення їх металургійних характеристик, зменшення витрат жароміцних і легованих сталей, а також поліпшення енергетичної ефективності роботи обпалювальних машин.

Виклад основного матеріалу

Сучасні підприємства для виробництва залізорудних окатишів оснащені конвеєрними обпалювальними машинами, на яких встановлені обпалювальні візки з колосниками, відлитими з жаростійкої сталі. Маса колосників з жаростійкої сталі 40X24H12CЛ з температурою утворення окалини 1000-1050°C на випалювальних машинах різної площі знаходиться в межах 193,5-416 т, при цьому питома експлуатаційна витрата колосників становить 0,06-0,15 кг/т окатишів. Для істотного зниження капітальних витрат (на будівництво нових цехів) і витрат на нове обладнання економічно доцільніше замінити на діючих конвеєрних машинах колосники перфорованими конструкціями меншої маси, забезпечивши їм термін експлуатації не менше, ніж колосників. У зв'язку з цим відпрацьовувалися конструкції сталевих перфорованих піддонів, їх кріплення до випалювальних візків конвеєрних машин і режими термозміцнення залізорудних окатишів.

З метою вивчення можливості заміни колосників на обпалювальних візках конвеєрних машин, відпрацювання їх конструкції та кріплення на візках, технологічного процесу термозміцнення сирих окатишів були проведені напівпромислові та дослідно-промислові випробування, в яких оптимізовано конструктивні особливості піддонів, форму отворів і величину живого перерізу їх перфорованої поверхні, а також варіанти кріплення піддонів на обпалювальних візках. Відпрацьовані режими термозміцнення сирих окатишів з підвищеною висотою донної постілі, для виключення перегріву піддонів і поліпшення металургійних характеристик обпалених окатишів.

У напівпромислових умовах режими термозміцнення сирих окатишів і конструктивні особливості подин відпрацьовувалися в установці типу чаша (рис. 1) діаметром в світлі 300 мм і висотою 500 мм, обладнаній колосниками з можливістю їх заміни перфорованою подиною товщиною 5 мм з листової легованої сталі 12X18H10T з температурою утворення окалини 850°C (через відсутність інших марок сталі).

Термозміцнення окатишів на колосниках здійснювали на донній постілі висотою 100 мм (як на промислових агрегатах), а на подині підбирали висоту постілі (від 100 до 300 мм), виходячи з умови впливу на подину газів, що відходять від шару, з температурою в межах 850-1050°C.

Експериментально визначено вплив живого перерізу перфорованої подини, форми її отворів і висоти шару донної постілі на її газодинамічний опір.

Встановлено, що виходячи з міцнісних характеристик подини товщиною 5 мм і її мінімального газодинамічного опору, оптимальний живий переріз повинен бути 19-20% (рис. 2), а форма отворів – довгастою з рівними краями (рис. 3).

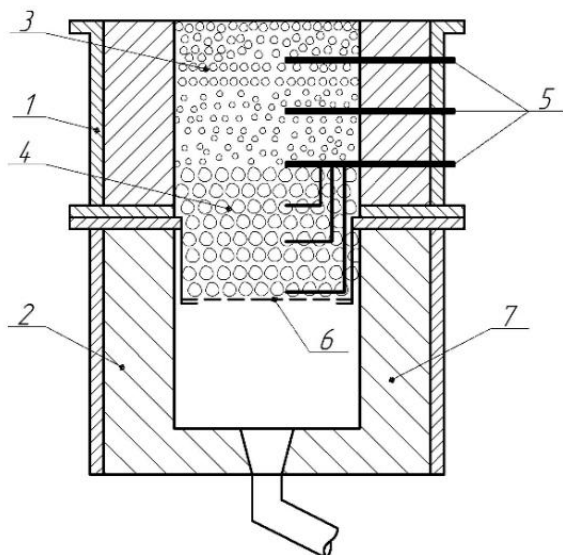


Рис. 1 – Чаша для термозміцнення окатишів: 1 – чаша; 2 – вакуум-камера; 3 – окатиші, що обпалюються; 4 – постіль; 5 – термопари; 6 – перфорована подина; 7 – футерівка

Збільшення висоти шару постілі підвищує її газодинамічний опір (див. рис. 3), тому обмеження її висоти є максимальні температури відхідних газів і утворення окалини подини.

В якості жаростійкої сталі для виготовлення подини випробовувалися наступні марки сталі: 12X18H10T, 20X23H18 і 15X28T з температурами утворення окалини, відповідно, 850°C, 1050°C і 1150°C. Для збільшення терміну служби піддонів бажано застосовувати сталь з максимальною температурою утворення окалини.

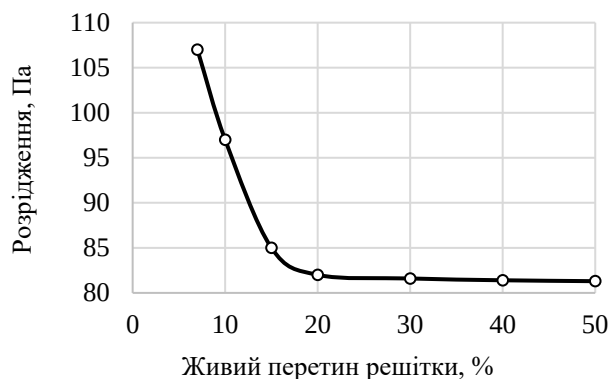


Рис. 2 – Вплив живого перерізу подини на її опір газовому потоку

Також проведено визначення зносостійкості подини товщиною 5 мм у процесах завантаження та розвантаження окатишів, змодельованих виходячи з відомого циклу при річній роботі випалювальних візків близько 8000 год/рік, а також при абразивному впливі просочуваних запиленних (1 г/м^3) газів. Результати випробувань показали, що знос подини від цих впливів склав 0,5% від її маси.

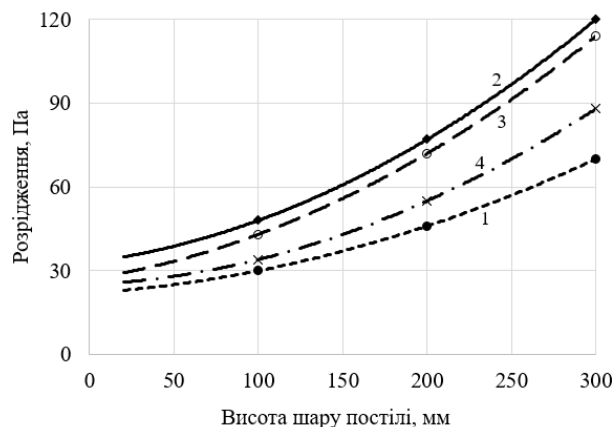


Рис. 3 – Вплив форми отворів та висоти постілі на подині на газодинамічний опір: 1 – сітка; 2 – подина з круглими отворами; 3 – подина з прорізними отворами; 4 – подина з довгастими отворами

Відпрацювання режимів термозміцнення окатишів у обпалювальній чаші показало, що металургійні характеристики обпалених на подині окатишів за всіма показниками (міцність на стиск, на удар і стирання, а також комплекс властивостей при відновленні) на 3-5% (відн.) кращі, ніж у випалених на колосниках. Причому, при практично однакових показниках металургійних характеристик верхнього шару обпалених окатишів, середній і, особливо, нижній шари мали істотно кращі характеристики при випалюванні на подині. При цьому питома продуктивність установки з подиною зросла з 0,8 до 0,805 т/м²·год (табл. 1).

На підставі даних напівпромислових досліджень була розроблена конструкторська документація і виготовлені комплекти сталевих перфорованих піддонів [13] для заміни колосників на випалювальних візках конвеєрних машин ОК-306 і ОК-552 ПівніГЗКа шириною, відповідно, 3,0 м і 4,0 м. Комплект піддонів для обпалювального візка довжиною 3 м складався з 16 піддонів, а для обпалювального візка довжиною 4 м – з 24 піддонів з отворами шириною 6 мм із закругленими краями і довжиною 26 мм. Крок між отворами, виходячи з необхідної міцності піддону, був прийнятий рівним 10 мм, а відстань між всіма рядів отворів – 15 мм. Зазначені розміри отворів і їх розташування, з урахуванням конструктивних особливостей підколосникових балок обпалювальних візків і робочих поверхонь самих піддонів, забезпечили живий переріз робочих поверхонь перфорованих піддонів 20,1%.

Таблиця 1

Металургійні властивості обпалених окатишів

Найменування показників	Метод термозміцнення	
	на колосниках	на подинах
Питома продуктивність, т/м ² ·год	0,8	0,805
Міцність на стиск, ДаН/ок	213	221
Міцність в барабані, % :		
на удар (+5 мм)	88,6	90,8
стираність (0-0,5 мм)	5,9	5,5
Міцність при відновленні, %:		
на удар (+5 мм)	77,6	80,8
стираність (0-0,5 мм)	9,3	7,9
ступінь відновлення	53,4	54,2
Газопроникність і усадка шару при відновленні:		
усадка шару, %	51,5	50,6
перепад тиску, Па	562,0	476,0
ступінь відновлення, %	93,2	93,0

Живий переріз колосникового поля обпалювальних візків склав 11,2%. Перфоровані подини мали жолобчастий поперечний переріз з висотою бортів 65 мм, що забезпечувало їм жорсткість, необхідну для сприйняття навантажень і, крім того, дозволяло підвищити висоту постілі на 115-130 мм без збільшення висоти бортів обпалювальних візків (рис. 4). Маса комплексу піддонів на один візок становила, відповідно, 0,17 і 0,25 т. На кожній конвеєрній машині випробовувалося по одному випалювальному візку з піддонами.

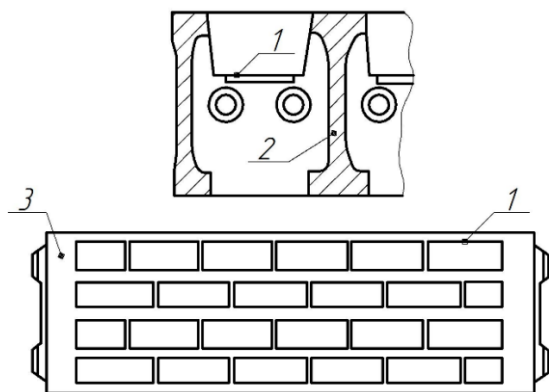


Рис. 4 – Обпалювальний візок з піддонами:
1 – перфорований піддон; 2 – підколосникова балка; 3 – обпалювальний візок

Обпалювальний візок з піддонами пропрацював безперервно 1272 години, а потім, після коригування і вдосконалення кріплення піддонів до підколосникових балок, візок знову був встановлений на обпалювальну машину і пропрацював безперервно ще 1008 годин. Таким чином, візок з піддонами пропрацював під наглядом 2280 годин. Після цього спостереження за візком з піддонами було припинено і він ще тривалий час працював на випалювальній машині.

За час експлуатації обпалювального візка з піддонами забивання отворів у піддонах окатишами та їх уламками не спостерігалось. Окалини на піддонах також не було. Відсутні були поломки, викривлення та інші несправності піддонів. Максимальна температура відходящих газів під піддонами під час безперервної роботи обпалювальної машини становила 570-620°C і підвищувалася до 730-780°C під час короткочасних (до 5 хвилин) зупинок обпалювального візка з піддонами у високотемпературній частині зони випалу. Це є наслідком збільшення висоти шару донної постілі на подині зі 100 мм (на колосниках) до 215-230 мм.

У період випробування обпалювальний візок з перфорованими подинами був зупинений в зоні охолодження і проведено розбір шару та відбір проб обпалених окатишів по висоті шару з цього та сусіднього візка з колосниками. Результати випробувань металургійних властивостей обпалених окатишів, наведені в табл. 2, показали, що міцнісні характеристики обпалених окатишів на візку з подинами вищі, ніж на візку з колосниками. Як видно, міцність при відновленні (+5 мм) вища, а стираність (-0,5 мм) нижча у окатишів, обпалених на візку з подинами, ніж на колосниках. Аналогічна відмінність властивостей окатишів за величинами усадки (ΔН) і газопроникності (ΔР) шару при відновленні під навантаженням.

Таблиця 2

Металургійні властивості обпалених окатишів за висотою шару

Обпалювальний візок	Міцність на стиск, ДаН/ок			
	Верх шару	Серединна	Низ шару	Середня
3 колосниками	230	251	176	214
3 подинами	228	265	212	232
Барабанні показники (+5 мм/-0,5 мм), %				
3 колосниками	92,4/6,8	93,6/5,3	88,3/10,8	90,7/8,2
3 подинами	92,6/6,9	94,1/4,9	91,7/7,3	92,4/6,7
Міцність при відновленні (+5 мм/-0,5 мм), %				
3 колосниками	81,6/5,6	78,6/5,1	72,6/17,3	77,6/9,3
3 подинами	79,8/5,6	84,6/4,8	78,1/8,5	80,8/6,2
Усадка та газопроникність шару при відновленні (ΔН, мм/ΔР, Па)				
3 колосниками	49,8/542	50,7/558	56,1/580	52,2/560
3 подинами	48,6/395	50,3/430	53,2/450	50,6/425
Ступінь відновлення, %				
3 колосниками	93,2			
3 подинами	93,0			

Розраховано зниження витрати легованої сталі в разі заміни колосників на обпалювальних візках перфорованими піддонами на кожному типі обпалювальних машин, що працюють на фабриках з виробництва залізрудних окатишів України (табл. 3).

Таким чином, виконані напівпромислові та промислові випробування показали, що заміна колосників піддонами дозволить зменшити витрату

високолегованого металу на 85-87%, підвищити продуктивність обпалювальних машин і поліпшити металургійні характеристики обпалених окатишів. У разі використання для виготовлення піддонів жаростійкої листової сталі марки 20X23H18 товщиною 5-7 мм з температурою утворення окалини 1050°C, як у колосників (марка сталі 40X24H12СЛ), термін служби піддонів істотно збільшиться.

Таблиця 3

Економія легованої сталі на конвеєрних обпалювальних машинах при заміні колосників подинами

Тип обпалювальної машини та їх кількість на ГЗКа	Кількість візків на машині, шт	Маса колосників на машині, т	Маса подин на машині, т	Економія сталі на машині, т
ОК-278 ПівнГЗК 2 шт.	129	193,5	25,8	167,7
ОК-306 ПівнГЗК 2 шт.	189	226,8	34,0	192,8
ОК-336 ЦГЗК 1 шт.	142	284,0	35,5	248,5
ОК-552 ПівнГЗК 2 шт.	208	416,0	52,0	364,0

Висновки

Розроблено конструкцію жаростійкої сталевий перфорованої подини та спосіб її кріплення, що дозволяють замінити колосники на випалювальних візках конвеєрних машин для термозміцнення залізрудних окатишів. Запропоноване технічне рішення забезпечує підвищення ефективності термозміцнення залізрудних окатишів, економію дорогих матеріалів і збільшення продуктивності без потреби у масштабній реконструкції обладнання.

Перелік використаних джерел

- [1] Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed / T.C. Souza Pinto et al. *Drying Technology*. 2021. Vol. 39, iss. 10. Pp. 1359-1370. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>.
- [2] Modelling of heat transfer in a straight grate pellet induration reactor complemented with plant scale experiments / T. Thorat et al. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. 2021. Vol. 131, iss. 3. Pp. 283-289. DOI: <https://doi.org/10.1080/25726641.2021.1984828>.
- [3] High temperature oxidation behavior of heat resistant steel with rare earth element Ce / S. Wang et al. *Materials Research Express*. 2020. Vol. 7, № 1. Article 016571. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab692d>.
- [4] Experimental and numerical investigation of iron ore pellet firing using coupled CFD-DEM method / Amani H., Alamdari E. K., Moraveji M. K., Peters B. *Particuology*. 2024. Vol. 93. Pp. 75-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.05.018>.
- [5] CFD prediction of heat/mass transfer in multi-layer sintering process assisted with gaseous fuel injection / Z. Cheng et al. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 128. Article 105654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105654>.
- [6] Copeland C. R., Claremboux V., Kawatra S. K. A Comparison of Pellet Quality from Straight-grate and Grate-kiln Furnaces. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. Vol. 40(3). Pp. 218-223. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827508.2018.1536050>.
- [7] Anishchenko A., Kukhar V., Oginskiy I. Design and Durability of Roller Assemblies in Sintering Machines. *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (с. 342–353). Springer International Publishing, 2022. Pp. 342-353. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_40.
- [8] Nilsson E. A. A., Tegman R., Antti M. L. Thermal cycling of grate-link material for iron ore pelletising process. *Ironmaking & Steelmaking*. 2016. Vol. 44(4). Pp. 269-280. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1210404>.
- [9] Physico-chemical profile and corrosion mechanism of the failure grate bar from iron ore sintering process / X. Fan et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 20. Pp. 428-439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.130>.
- [10] CO reduction in sintering flue gas by CFD-ML for process parameters optimization / F. Wang et al. *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 500. Article 145268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145268>.
- [11] Dragge R. The «Steel Belt» Process. *Proceedings of the 4th International Symposium on Pelletizing*, Toronto, 2-5 June 1985. Pp. 1-12.
- [12] Söderholm K., Larsson L., Söderholm P. Managing the 1970s energy crises in a state-owned mining company: strategies pursued by the Swedish iron ore producer LKAB. *Mineral Economics*. 2017. Vol. 31(1-2). Pp. 179-190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13563-017-0122-y>.
- [13] Візок випалювальних або агломераційних конвеєрних машин: пат. на корисну модель 90519 Україна: МПК С22В1/14. № u201400551; заявл. 20.01.2014; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10. 5 с.

THERMAL STRENGTHENING OF IRON ORE PELLETS ON STEEL PERFORATED BEDS

Chuprynov Ye.V.	PhD (Engineering), associate professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8605-3434 , e-mail: itchupa@gmail.com ;
Kassim D.O.	D.Sc. (Engineering), professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1750-1237 , e-mail: kassim@duet.edu.ua ;
Zaitsev G.L.	PhD (Engineering), associate professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7909-9044 , e-mail: zaitsev@duet.edu.ua ;
Liakhova I.A.	PhD (Engineering), associate professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7589-8351 , e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua ;
Maliy K.V.	PhD (Engineering), associate professor, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9046-4268 , e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education

The purpose of the work is to substantiate and experimentally verify the effectiveness of using steel perforated grates instead of grate bars in the process of heat treatment of iron ore pellets. The tasks include improving the metallurgical characteristics of pellets, reducing the consumption of heat-resistant steels, and improving the energy efficiency of roasting machines. The research was conducted in semi-industrial (bowl-type installation) and experimental-industrial conditions on conveyor kilns (SM-306, SM-552). It has been established that the optimal live cross-section of a perforated grate with a thickness of 5 mm is 19-20 % with elongated holes with straight edges. Semi-industrial tests have shown that the metallurgical characteristics of pellets calcined on a perforated grate are 3–5% (relative) better in all respects compared to pellets calcined on grates. At the same time, the specific productivity of the installation increased from 0.8 to 0.805 t/m²·hour. Based on these data, a design of grooved perforated pallets with a live cross-section of 20.1 % was developed for industrial testing. The roasting trolley with pallets operated continuously for over 2,280 hours without clogging the holes, forming scale, breaking down, or warping. The maximum temperature of the waste gases under the pallets did not exceed 780 °C due to an increase in the height of the bottom bed (to 215-230 mm instead of 100 mm). Industrial tests confirmed that the strength characteristics of pellets burned on the bottom (especially in the lower layer) are higher, and the abrasion and gas permeability indicators during recovery are better compared to pellets from a grate trolley. The key scientific and practical result is the development and successful industrial testing of a perforated steel grate design, which reduces the consumption of high-alloy metal by 85–87 % compared to grate bars, increases the productivity of roasting machines, and improves the metallurgical properties of pellets. The scientific novelty lies in the comprehensive experimental study of perforated grate bars in industrial conditions and the establishment of optimal geometric parameters for the holes. The practical significance lies in significant savings in expensive materials and increased heat treatment efficiency without major production reconstruction. Further research may be directed toward optimizing the choice of steel grade for hearths (taking into account the high temperature of scale formation) to ensure maximum service life.

Keywords: pellet induration, perforated hearth plate, grate bars, sintering machine / induration furnace, iron ore feed, metallurgical properties, metal saving / material economy, gas dynamic resistance, open area ratio (live cross-section), alloy steel consumption.

References

- [1] T.C. Souza Pinto, et al., "Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed," *Drying Technology*, vol. 39, iss. 10, pp. 1359-1370, 2020. doi: [10.1080/07373937.2020.1747073](https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073).
- [2] T. Thorat, V.N. Nurni, M. Basavaraja, M. Singhai, S. Hazra, and A. Mogale, "Modelling of heat transfer in a straight grate pellet induration reactor complemented with plant scale experiments," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, vol. 131(3), pp. 283-289, 2021. doi: [10.1080/25726641.2021.1984828](https://doi.org/10.1080/25726641.2021.1984828).
- [3] S. Wang, et al., "High temperature oxidation behavior of heat resistant steel with rare earth element Ce," *Materials Research Express*, vol. 7(1), article 016571, 2020. doi: [10.1088/2053-1591/ab692d](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab692d).
- [4] H. Amani, E.K. Alamdari, M.K. Moraveji, and B. Peters, "Experimental and numerical investigation of iron ore pellet firing using coupled CFD-DEM method," *Particuology*, Vol. 93, Pp. 75-86, 2024. doi: [10.1016/j.partic.2024.05.018](https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.05.018).

- [5] Z. Cheng, P. Fu, Z. Guo, J. Yang, and Q. Wang, "CFD prediction of heat/mass transfer in multi-layer sintering process assisted with gaseous fuel injection," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 128, article 105654, 2021. doi: **10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105654**.
- [6] C.R. Copeland, V. Claremboux, and S.K. Kawatra, "A Comparison of Pellet Quality from Straight-grate and Grate-kiln Furnaces," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 40(3), pp. 218-223, 2018. doi: **10.1080/08827508.2018.1536050**.
- [7] A. Anishchenko, V. Kukhar, and I. Oginskiy, "Design and Durability of Roller Assemblies in Sintering Machines," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer International Publishing, 2022, pp. 342-353. doi: **10.1007/978-3-030-85230-6_40**.
- [8] E.A.A. Nilsson, R. Tegman, and M.L. Antti, "Thermal cycling of grate-link material for iron ore pelletising process," *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 44(4), pp. 269-280, 2016. doi: **10.1080/03019233.2016.1210404**.
- [9] X. Fan, et al., "Physico-chemical profile and corrosion mechanism of the failure grate bar from iron ore sintering process," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 428-439, 2022. doi: **10.1016/j.jmrt.2022.07.130**.
- [10] F. Wang, K. Wang, L. Tang, K. Li, and C. Wang, "CO reduction in sintering flue gas by CFD-ML for process parameters optimization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 500, article 145268, 2025. doi: **10.1016/j.jclepro.2025.145268**.
- [11] R. Dragge, "The «Steel Belt» Process," in *Proceedings of the 4th International Symposium on Pelletizing*, Toronto, June 2-5, 1985, pp. 1-12.
- [12] K. Söderholm, L. Larsson, and P. Söderholm, "Managing the 1970s energy crises in a state-owned mining company: strategies pursued by the Swedish iron ore producer LKAB," *Mineral Economics*, vol. 31(1-2), pp. 179-190, 2017. doi: **10.1007/s13563-017-0122-y**.
- [13] V.P. Lyalyuk, et al., "Vizok vypaliuvalnykh abo ahlomeratsiinykh konveiernykh mashyn" ["Trolley for firing or sintering conveyor machines"], UA Utility Model 90519, May 26, 2014. (Ukr.)
- Стаття надійшла 02.09.2025
Стаття прийнята 28.09.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Термозміцнення залізородних окатишів на сталевих перфорованих подинах / Є. В. Чупринов та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 79-85. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344658>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ОЗОНУ ЗА КИСНЕВИМ СТРУМЕНЕМ, СТВОРЕНОГО ВИСОКОВОЛЬТНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ РОЗРЯДОМ НА ВИХОДІ З ПРОДУВНОЇ ФУРМИ

Семикін С.І.	канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7365-2259 , e-mail: isisemykin@gmail.com ;
Голуб Т.С.	канд. техн. наук, ст. дослідник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9269-2953 , e-mail: isinasu.golubts@gmail.com ;
Дудченко С.О.	канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7319-9896 , e-mail: s.dudchenko@meta.ua ;
Вакульчук В.В.	канд. техн. наук, наук. співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7887-2843 , e-mail: vvvakulchuk@gmail.com ;
Прокопенко П.Г.	головний метролог, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7645-1740 , e-mail: ogm-ichm@ukr.net

Ключовою ланкою для киснево-конвертерного процесу є протікання окислювально-відновних обмінних процесів за участю кисню, які є гетерогенними та мають різний час перебігу в залежності від місця перебігу, «дійових осіб» окрім кисню, інтенсивності руху розплавлених мас та активності самого кисневого потоку (того, як і у якій кількості кисень проникає між межами розділу фаз, що взаємодіють, та реагує з іншими елементами). Відповідно для його інтенсифікації необхідно активізувати процеси окислення, що можливо завдяки активізації кисневого потоку, наприклад, при перетворенні частини кисню на озон. В роботі проведено дослідження генерації озону високовольтним електричним розрядом безпосередньо на виході з продувного сопла верхньої кисневої фурми та його розподілу за кисневим струменем. Встановлено, що максимальний рівень концентрації озону за довжиною струменя спостерігається на відстані 5-7 калібрів та у подальшому при розширенні струменя його концентрація зменшується в результаті розбавлення киснем. Відповідно до досліджень за перетином встановлено зосередження озону в центрі струменя впродовж усього потоку. За отриманими результатами було зроблено емпіричний коефіцієнт розширення кисневого струменя для оцінки продуктивності озону. Встановлено, що при локалізації розряду на виході з продувного сопла на відстані 40 калібрів (що є робочою висотою розміщення продувної фурми відносно рівня металевої ванни у кисневому конвертері у промислових умовах) за довжиною кисневого струменя продуктивність озону складатиме 15 мг/хв, що, на думку авторів, є достатнім для проведення активізації окислювальних обмінних процесів.

Ключові слова: озон, продуктивність генерації, киснева фурма, киснева продувка, газовий струмінь, високовольтний розряд.

Постановка проблеми

Світове виробництво сталі в сучасних умовах є єдиним надійним способом масового виробництва конструкційного матеріалу та підтримується на стало високому рівні [1]. Із загального виробництва сталі в 1,885 мільярда тон у 2024 році як на Європейських, так і в своїй більшості на світових металургійних заводах основний киснево-конвертерний процес відіграє переважну роль. Його частка 70,4% у загальному світовому масштабі, 55,6% у країнах Європейського союзу й 60,9% у країнах СНД [1]. Більшість використовуваних процесів відповідають кисневим конвертерам з верхнім дуттям. Тому продуктивність, економічність і якість сталі, виробленої за допомогою кисневих конвертерів, постійно знаходяться у фокусі уваги сталеліварної промисловості в усьому світі. Ці аспекти, з однієї сторони, визначаються якістю сировини (чавуну,

брухту), а з іншої – динамікою процесу. Конвертерний процес характеризується високою швидкістю реакції, проте, не дивлячись на досить невеликий часовий проміжок, процес постійно потребує інтенсифікації та відповідності швидкостям сучасності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Киснево-конвертерний процес – це складний процес, який відбувається протягом короткого проміжку часу, з дуже невеликою кількістю прямої зворотної інформації в ході процесу та з використанням різних теплоносіїв, основними з яких є рідкий чавун, брухт і залізна руда. Потенціальна теплота цих речовин вивільняється завдяки взаємодії з киснем (як газоподібним, так і розчиненим у об'ємі ванни), який доставляється в процесі плавки за рахунок дії надзвукових струменів з кисневої продувної фурми в обсяг ванни. Реакції

окислення є гетерогенними та мають різний час перебігу. Більша частина реакції відбувається в масштабі дрібної краплі чи газової бульбашки, які розподілені у фазах емульсія шлак/метал/газ. Різниця в геометричних масштабах, як наслідок, зумовлює різницю в масштабах часу: металева ванна може змінюватися протягом усього циклу продувки 12-15 хвилин, тоді як краплі можуть пройти повний цикл рафінування приблизно за хвилину [2-4]. Таким чином, інтенсифікація процесів окислення можлива через активізацію кисневого потоку та його розчинності у розплаві.

Відомо, що озон є більш активним окисником ніж кисень [5, 6]. Найчастіше його використовують у медичних цілях [7-9]. Проте були ідеї його використання у чорній металургії [10, 11]. Головною думкою в цьому випадку є те, що окисні реакції за участі озону повинні відбуватися швидше, ніж при використанні для продувки кисню. Проте ці ідеї не знайшли широкого загалу через той факт, що озон планували створювати поза межами металургійних агрегатів та подавати по трубах. А через низьку стабільність молекул озону, фактична кількість активної речовини, що може дійти до металургійної ванни, була вкрай низька.

Авторами запропонований інший спосіб створення озону високовольтним розрядом безпосередньо на виході з продувної фурми, що повинно вирішити питання швидкого розпаду його молекул під час руху по комунікаціях. Проведене високотемпературне дослідження на 60-кг моделі кисневого конвертера з продувкою зверху (в лабораторних умовах ДДТУ) можливості та ефективності використання електричного розряду для інтенсифікації киснево-конвертерних процесів показало доцільність цього способу. Відмічено підвищення рівня теплоти ванни (в середньому на 250-400°C) та пришвидшення реакції окислення вуглецю (в середньому на 30-40 %) зі скороченням тривалості продувки на 10% та зниженням рівня виділення пилу на 40% в початковий період та 60% в основний період продувки [12]. Для цих досліджень була створена фурма з наконечником спеціальної конструкції, який мав щільне кільцеве сопло з розміщеним всередині електродом для створення іскрового розряду на виході з сопла. Попередні дослідження на високотемпературній 60-кг моделі щодо використання щільного сопла такого типу для верхньої продувки також показали значні відмінності процесу конвертування у порівнянні зі стандартним варіантом продувки крізь чотирисоплову фурму. Відмічено приріст температури вихідних газів (в середньому на 150-200°C), температури у підфурмній області (на 300-400°C), підвищення швидкості окислення вуглецю (на 10-30%) та зниження рівня виділення пилу у початковий період на величину до 6% та у основний період на величину порядку 40% [13, 14]. Тобто під час продувки активізованим іскровим електричним розрядом кисневим потоком металева ванна зазнавала подвійного впливу: як струменів, що витікають з кільцевого щільного сопла, так і впливу сформованого розрядом озону. При цьому, відповідно до

отриманих результатів, ймовірно, приріст тепловмісту ванни у більшій мірі зумовлений використанням кільцевого щільного сопла. Відповідно, необхідно з'ясувати, чи може бути зареєстроване значне підвищення швидкості окислення вуглецю та зниження виділення пилу пов'язане з формуванням озону.

Мета статті

Метою даного дослідження було вивчення розподілу озону за довжиною та шириною кисневого струменя за умов безпосередньої активізації на виході з продувального сопла задля оцінки частки впливу озону в отриманих результатах високотемпературного експерименту.

Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень було створено стенд для фізичного моделювання активізації високовольтним іскровим розрядом (з напругою 25-30 кВ на джерелі струму) кисневого струменя під час продувки крізь кисневу фурму. Функціональна схема установки наведена на рис. 1.

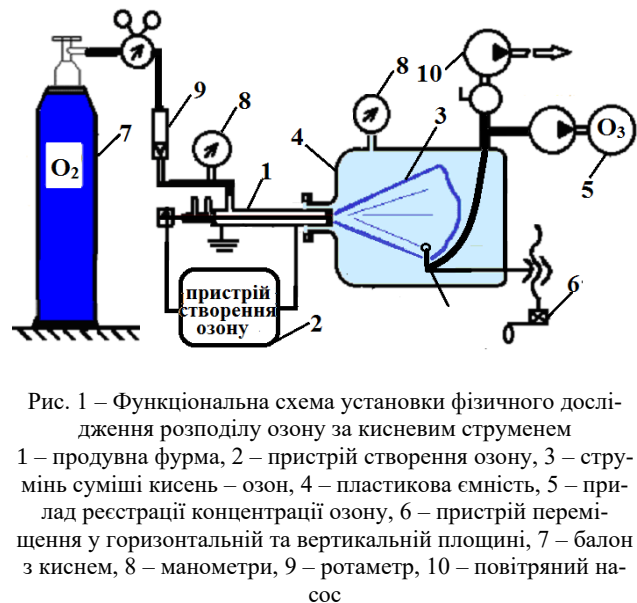


Рис. 1 – Функціональна схема установки фізичного дослідження розподілу озону за кисневим струменем

1 – продувна фурма, 2 – пристрій створення озону, 3 – струмінь суміші кисень – озон, 4 – пластикова ємність, 5 – прилад реєстрації концентрації озону, 6 – пристрій переміщення у горизонтальній та вертикальній площині, 7 – балон з киснем, 8 – манометри, 9 – ротаметр, 10 – повітряний насос

Озон формувався на виході з кільцевого сопла з зовнішнім діаметром $6 \cdot 10^{-3}$ м та внутрішнім $5 \cdot 10^{-3}$ м кисневої продувної фурми за допомогою пристрою створення озону, який створював високовольтний кистьовий розряд (використовувалася та ж фурма, що й у високотемпературних дослідках). Дослідження проводили при фіксованих за допомогою електронного цифрового манометру ДМ5002 рівнях тиску 0,05; 0,1; 0,2 МПа. Вимірювання концентрації озону проводили за допомогою приладу вимірювання озону Циклон 5-21 шляхом відбору порції газової суміші в різних послідовних ділянках газового струменя за довжиною від 2,5 калібрів до 40 калібрів відносно зрізу сопла фурми

в двох напрямках: наближення до сопла та віддалення від сопла. Також вимірювання проведені по перетину уявного контуру кисневого струменя. Кожен вимір повторювали тричі.

Результати та їх обговорення

Результати дослідів вимірювання концентрації озону за довжиною кисневого струменя при різних тисках продувального газу узагальнені на рис. 2. Аналіз отриманих результатів показав, що концентрація озону при віддаленні від сопла знижувалася в результаті розведення його в суміші та за рахунок розширення кисневого струменя із залученням навколишнього середовища. Зіставлення розподілу за довжиною струменя концентрації озону при різних тисках показало, що більш високі концентрації впродовж всього струменя досягалися при невисокому рівні тиску (при 0,05 МПа).

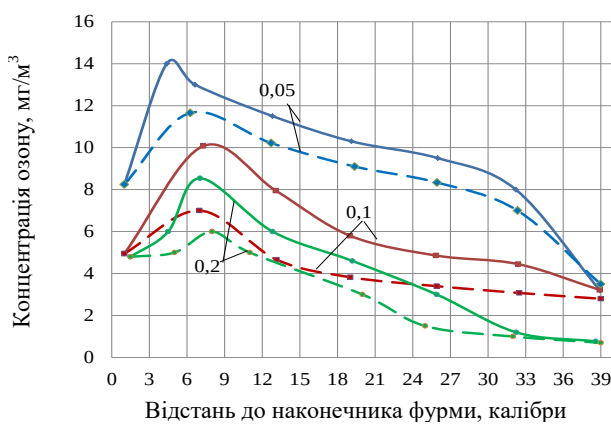


Рис. 2 – Зміна концентрації озону за довжиною струменя при трьох тисках кисню (цифри біля кривих відповідають тиску в МПа; суцільна лінія – переміщення до сопла фурми, пунктирна – від сопла)

Цей ефект пояснюється тим, що при збільшенні тиску кисню збільшувалася швидкість витікання струменя при інших рівних умовах (діаметрі сопла, точці виміру), що призводило до збільшення щосекундної порцій кисню та більшого «розведення» кисневим струменем утвореного озону (оскільки конкретна потужність розряду здатна утворити певну кількість озону з заданого обсягу кисню, що знаходиться в конкретному місці). На рівні 40 калібрів, що відповідає висоті розташування продувної фурми у промислових агрегатах, концентрація озону за дослідних умов складала 1,5-2,0 мг/м³ при тиску продувального газу 0,2 МПа та 3,0-3,5 мг/м³ при тиску 0,1 МПа. Однак слід враховувати те, що під час реальної продувки сталеплавильна ванна знаходиться в постійному русі, і протягом більшого проміжку часу продувки наконечник фурми занурений в шлако-металеву емульсію в результаті підйому ванни. Тому слід брати до уваги концентрацію озону на відстані вже від 5-8 калібрів, рівень якої

вищий й складав 5,00-8,54 мг/м³ при 0,2 МПа та 7-10 при тиску 0,1 МПа (дослідження на високотемпературній моделі проводили при тиску продувального газу 0,1-0,12 МПа).

Також слід відзначити встановлений ефект, який полягає в тому, що при переміщенні датчика у напрямку до сопла, рівень значень озону був вище, ніж при русі від сопла. Це пояснюється складанням концентраційних газових потоків в області пробовідбірника при русі його в сторону зрізу сопла, оскільки відбувається ущільнення газу перед ним. І навпаки, при зворотному русі вхідного отвору пробовідбірника відбувається розрідження газових потоків й середовища перед пробовідбірником.

Результати вимірювання концентрації озону по перетину уявних контурів кисневого струменя наведені на рис. 3 для тиску продувального газу 0,05 МПа (обрано цей варіант через найвищий рівень концентрації озону, що дозволяє найбільш показово проілюструвати відмінність у різних точках. Для інших досліджених тисків продувального газу спостерігалися аналогічні тенденції).

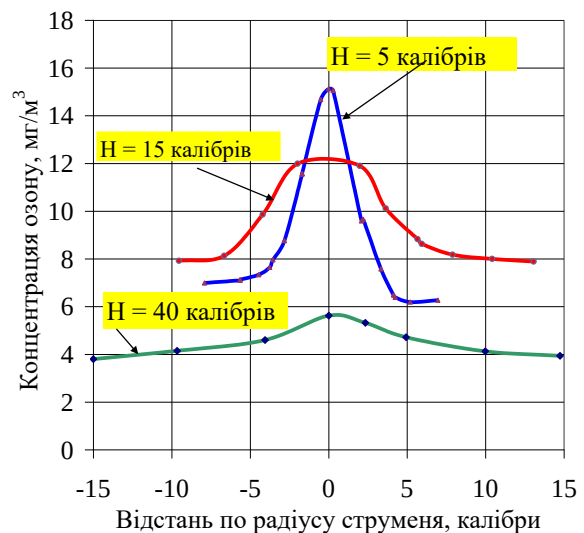


Рис. 3 – Розподіл озону по перетину струменя на відстанях: 5, 15 і 40 калібрів (відмічено біля кривих), при тиску 0,05 МПа

Аналіз профілю і контурів ядра струменя, що містить озон, показав істотне розширення струменя на початковій відстані поблизу наконечника фурми. Як видно з рисунку 3, на початковій ділянці за умов дослідження генерується озон з максимальною концентрацією (аналогічні дані отримані при всіх вивчених значеннях тиску кисню). Рівень значень концентрації озону знижується в міру розширення кисневого струменя у міру віддалення від цієї відстані таким чином, що на відстані 40 калібрів вміст озону знижується в 3 рази.

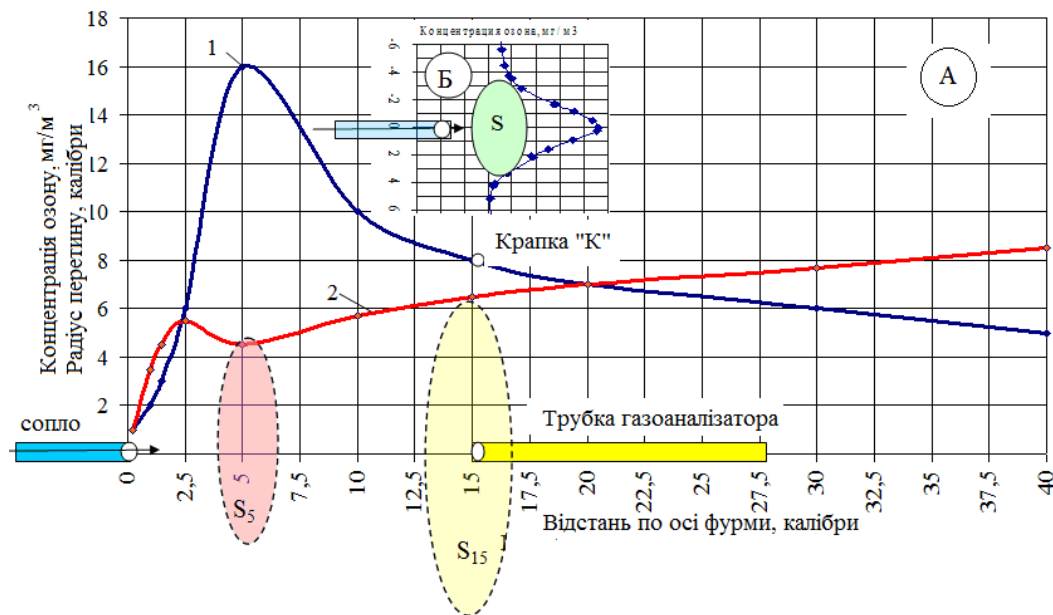


Рис. 4 – Діаграми А – зміни концентрації озону за довжиною вісі струменя (1) та межа струменя (2) (указані перетини на відстані 5-ти й 15-ти калібрів S_5 та S_{15}). Б – розподіл концентрації озону в поперечному перетині струменя для крапки «К»

На рис. 4 показані узагальнені за результатами проведених дослідів зміни концентрації озону за довжиною струменя у співставленні з лініями уявної межі кисневого струменя для тиску продувального газу 0,05 МПа. Видно, що на відстані від зрізу сопла рівному 5 калібрів відбувається формування озону завдяки наявному високовольтному розряду, про що свідчить максимальна кількість озону в цьому перерізі. Ця відстань, за умов формування розряду на виході між електродом на його стінках, зумовлена дією газового потоку на електричний розряд, що спричиняє його «витягування» вздовж центральної вісі [15, 16].

Також встановлено, що частина озону формується ще й всередині фурми в результаті «бар'єрного» ефекту між стінками фурми та пристроєм створення високовольтного розряду для продукування озону (не дивлячись на наявність ізоляції на частині електрода, що розміщено в середині фурми). Про це свідчить поява концентрації озону на ділянці на рівні 2,5 калібрів. Починаючи з даного перетину, струмінь кисню розширюється, що призводить до зниження концентрації озону за довжиною газового струменя пропорційно відношенню величин контрольованих перетинів струменя. Так, при переході від перетину 5 калібрів до перетину 15 калібрів концентрація озону знизилася в 2 рази за рахунок зміни розширення струменя в 2 рази (співвідношення площі перетину струменя на відстані 15 калібрів та 5 калібрів). Відповідно кисневий струмінь можна розділити на три принципово різні ділянки. Перша – найближча до наконечника фурми, до 4-5 калібрів, найскладніша з точки зору умов формування озону через розрив у цьому місці струменя й його вкрай стрімке розширення у порівнянні з умовами виходу з сопла.

Друга – вузька зона перетворень молекул кисню в молекули озону, що локалізується на відстані 5 калібрів сопла. У цьому місці завдяки електричному високовольтному розряду, що «пробігає» крізь кисневий струмінь, формується озон. Далі за довжиною струменя розміщена найбільш довга третя ділянка, на якій відбувається в основному розбавлення концентрації озону в результаті розширення кисневого струменя та залучення до нього повітря й часткової рекомбінації озону під час зіткнення з молекулами повітря чи кисню. На цій ділянці утворюється суміш кисню, озону та повітря.

На базі отриманих результатів досліджень було введено встановлений емпірично коефіцієнт перерахунку максимального значення концентрації озону на усереднене значення в межах кожного з оцінюваних перетинів. Отримані результати у вигляді даних продуктивності генерації озону (продуктивність, мг/хв, як показник динамічний введено надалі замість показника концентрації, який вказував тільки на концентрацію у відібраній пробі газової суміші) після врахування коефіцієнту перерахунку наведені на рис. 5. З діаграм видно, що продуктивність по озону збільшується з підвищенням витрати газу й зменшується при віддаленні від сопла продувної фурми. Результати продуктивності після врахування емпіричного коефіцієнту перерахунку свідчать про те, що щохвилинне утворення озону за довжиною струменя має невеликий відсоток зниження на рівні 0,5% через кожні 10 калібрів. Тобто можливо очікувати, що на робочій відстані фурми, що складає 40 калібрів, продуктивність озону складатиме на рівні 15 мг/хв. Це зумовлює додатковий приріст окислювального потенціалу кисневого струменя (й

відображатися на пришвидшенні окислення таких компонентів розплаву, як вуглець, та дією на пил шляхом надання додаткового заряду).

Виходячи з вищенаведеного було запропоновано для оцінювання виходу озону за плавку (г/т) наступну формулу:

$$GO_3 = 0,001 \cdot CO_3 \cdot QO_2 \cdot Kp \cdot \tau / G_{\text{металу}}, \quad (1)$$

де: GO_3 – питома кількість сформованого за плавку озону, г/т; CO_3 – концентрація O_3 на відстані 40 калібрів, мг/м³; QO_2 – витрата кисню, м³/хв; Kp – коефіцієнт розбавлення озону в струмені; τ – час продувки, хв, $G_{\text{металу}}$ – вага металу (т).

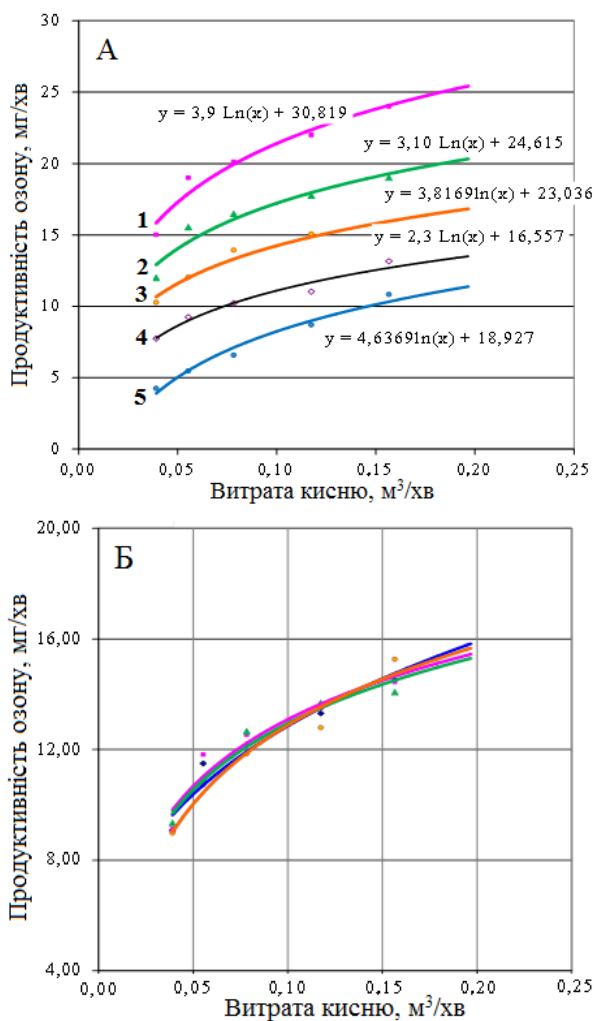


Рис. 5 – Продуктивність генерації озону при різній витраті кисню без урахування емпіричного коефіцієнту (А) та з урахуванням емпіричного коефіцієнту (Б) на відстанях від продувального сопла: 1 – 5 калібрів, 2 – 10 калібрів, 3 – 15 калібрів, 4 – 20 калібрів, 5 – 40 калібрів

Ще одним, окрім відмічених вище, підтвердженням дії озону на окислювальні процеси під час продувки металевого розплаву може бути встановлена під час додаткового аналізу відеозаписів проведення високотемпературних досліджень різниця у швидкості

засвоєння вапна за умов продувки активізованим іскровим розрядом кисневим потоком з формуванням озону та продувки крізь щільне кільцеве сопло без розряду. Для активного засвоєння вапна необхідним процесом є надходження оксидів заліза до шлаку, які «розчиняють» шматочки вапна [17, 18]. Період знаходження шматочків вапна на шлаковій поверхні при аналізі відеокадрів і їх розігрів були повільніші при продуванні чистим киснем під час продувки крізь кільцеве сопло. Для першої порції вапна швидкість засвоєння за умов використання активізованого кисневого потоку була більшою на 15-20%, а для другої – на 10-15% відповідно (як додаткова інформація, у порівнянні з продувкою крізь чотирисопловий наконечник, який порівнювався з продувкою крізь кільцеве щільне сопло у [13, 14] така різниця у швидкості засвоєння вапна складе 30-40%). Для прикладу на рис. 6 наведено відеокадри продувки крізь кільцеве щільне сопло з активізацією електричним розрядом та без активізації у однаковий період продувки – 5 хвилин після присадки порції вапна. На відеокадрах видно значно меншу кількість шматочків вапна на поверхні ванни (чорні ділянки на яскравій поверхні ванни) за умов продувки активізованим іскровим розрядом кисневим потоком. Відповідно до встановленої різниці за умов однакового початкового складу металевого розплаву, можна зробити висновок, що у випадку продувки з активізацією іскровим розрядом та формуванням озону активніше утворюються оксиди заліза через високу реакційну здатність озону, які сприяють розчиненню вапна.

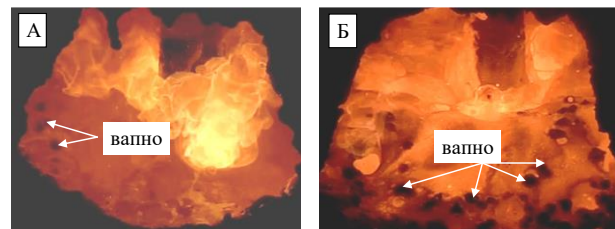


Рис. 6 – Фрагменти відеозапису високотемпературної продувки металевій ванні кисневим потоком крізь кільцеве щільне сопло з активізацією іскровим розрядом (А) та без активізації (Б) у однаковий час після додавання порції вапна

Висновки

За результатами проведеного фізичного дослідження характеру утворення та розповсюдження озону високовольтним електричним розрядом за довжиною та перетином кисневого струменя встановлено, що концентрація озону при віддаленні від сопла спочатку збільшується до максимального рівня на відстані 5-7 калібрів (відстань формування озону), а потім знижується в результаті розведення його в суміші за рахунок розширення газового струменя.

Щодо визначення озону за перетином струменя встановлено, що максимальна концентрація озону

зосереджується в центрі струменя – у його умовному ядрі.

Завдяки встановленому емпіричному коефіцієнту розширення кисневого струменя було встановлено, що продуктивність по озону зменшується на величину 0,5% за довжиною струменя до відстані 40 калібрів, що дає змогу передбачити, що достатня кількість озону дістається до металеві ванни у разі використання цього способу при верхній продувці в кисневому конвертері.

Таким чином можна підтвердити, що встановлений за результатами високотемпературних досліджень приріст показників швидкості окислення вуглецю та впливу на пил у порівнянні з продувкою крізь кільцеве щільне сопло, зумовлене достатньою кількістю озону, що формується на виході з продувної фурми та доходить з потоком газу до металевого розплаву.

Фінансування та подяки

Автори висловлюють щиру подяку співробітникам кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова ДДТУ на чолі з завідувачем кафедри проф., д.т.н. Сігарьовим Є.М., за допомогу у організації та проведенні високотемпературних досліджень, результати яких є предметом статті.

Перелік використаних джерел

- [1] 2025 World Steel in Figures. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf> (дата звернення: 10.07.2025).
- [2] Ghosh S., Bharath B. N., Viswanathan N. N. BOF process dynamics. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. Vol. 128 (1). Pp. 1-17. DOI: <http://doi.org/10.1080/25726641.2018.1544331>.
- [3] Alam M., Naser J., Brooks G. Computational fluid dynamics simulation of supersonic oxygen jet behavior at steelmaking temperature. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010. Vol. 41. Pp. 636-645. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9341-0>.
- [4] Coley K. S. Progress in the kinetics of slag-metal-gas reactions, past, present and future. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2013. Vol. 49(2). Pp. 191-199. DOI: <https://doi.org/10.2298/JMMB121220017C>.
- [5] Vosmaer F. Ozone: its manufacture, properties and uses. Leopold Classic Library, 2015. 232 p.
- [6] Extraction of metals by using ozone from residue solutions of metallurgical production / D. B. Kholikulov et al. *Integrated Innovative Development of the Zarafshan Region: Achievements, Problems and Prospects*: Proceedings of the II International Conference, Navoi, Uzbekistan, 27-28 November 2019. Pp. 65-68.
- [7] Ozone in water treatment: Application and engineering / ed. by B. Langlais, D. A. Reckhow, D. R. Brink. 1991. 592 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203744635>.
- [8] Wen L. H., Menon P. M., Choon N. K. Waste water treatment by micro air and ozone bubbles. *International Review of Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 3(3). Pp. 368-371.
- [9] Water and air ozone treatment as an alternative sanitizing technology / M. Martinelli et al. *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*. 2017. Vol. 58 (1). Pp. E48-E52. DOI: <https://doi.org/10.7203/jo3t.3.4.2019.15426>.
- [10] Способ выплавки стали: пат. 1354713 CPCP, C21 C5/28, 5/32. № 3979015/02; заявл. 22.11.85; опубл. 15.01.92, Бюл. № 2. 3 с.
- [11] Saidinik F., Behnejad H. Comparing oxidation of aluminum by oxygen and ozone using reactive force field molecular dynamics simulations. *Journal of Nanoparticle Research*. 2023. Vol. 25. Article 95. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-023-05739-w>.
- [12] Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters / S.I. Semykin et al. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. Vol. 83(2). Pp. 107-116. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.09>.
- [13] Високотемпературное исследование особенностей продувки металлической ванны в LD конвертере через кольцевое коаксиальное сопло / С.И. Семькин и др. *Метал та лиття України*. 2019. Т. 27, № 7-9. С. 27-32. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.07.027>.
- [14] Високотемпературное исследование особенностей продувки металла в конвертере через верхнюю кислородную фурму с кольцевым щелевым соплом / Семькин С. И., Голуб Т. С., Дудченко С. А., Вакульчук В. В. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2018. Вып. 32. С. 229-237.
- [15] Nijdam S., Teunissen J., Ebert U. The physics of streamer discharge phenomena. *Plasma Sources Science and Technology*. 2020. Vol. 29. Article 103001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05>.
- [16] Plasma-enhanced mixing and flameholding in supersonic flow / Firsov A., Savelkin K. V., Yarantsev D. A., Leonov S. B. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. Vol. 373. Article 20140337. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0337>.
- [17] Basic oxygen steelmaking slag: formation, reaction, and energy and material recovery / Li Z., Li J., Spooner S., Seetharaman S. *Steel research international*. 2022. Vol. 93. Iss. 3. Article 2100167. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202100167>.
- [18] Dissolution of lime in BOS slag: from laboratory experiment to industrial converter / Li Z. S., Whitwood M., Millman S., van Boggelen J. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*. 2014. Vol. 41(2). Pp. 112-120. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.0000000108>.

STUDY OF THE FEATURES OF OZONE PROPAGATION ALONG AN OXYGEN JET CREATED BY A HIGH-VOLTAGE ELECTRIC DISCHARGE AT THE OUTLET OF A BLOWING LANCE

Semykin S.I.	PhD (Engineering), senior researcher, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7365-2259 , e-mail: isisemykin@gmail.com ;
Golub T.S.	PhD (Engineering), senior researcher, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9269-2953 , e-mail: isinasu.golubts@gmail.com ;
Dudchenko S.O.	PhD (Engineering), senior researcher, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7319-9896 , e-mail: s.dudchenko@meta.ua ;
Vakulchuk V.V.	PhD (Engineering), researcher, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7887-2843 , e-mail: vvvakulchuk@gmail.com ;
Prokopenko P.H.	chief metrologist, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7645-1740 , e-mail: ogm-ichm@ukr.net

The oxygen converter process, which is currently the only competitive method of mass production of steel in world practice, is quite fast in terms of time and complex due to high temperatures and limited ability to influence the course of the processes accompanying it from the outside. It occurs due to the interaction of a supersonic oxygen flow with a molten metal bath containing liquid cast iron, molten scrap metal and other additional materials. That is, the key link for the converter process is the course of redox exchange processes with the participation of oxygen, which are heterogeneous and have different time of course depending on the place of flow, the "actors" other than oxygen, the intensity of the movement of molten masses and the activity of the oxygen flow itself (how and in what quantity oxygen penetrates between the interfaces of the phases that interact and react with other elements). Accordingly, to intensify the oxygen converter process, it is necessary to activate the oxidation processes, which is possible due to the activation of the oxygen flow, for example, when converting part of the oxygen into ozone. The work conducted a study of ozone generation by a high-voltage electric discharge directly at the outlet of the blow nozzle of the top oxygen lance and its distribution along the oxygen jet. It was established that the maximum level of ozone concentration along the length of the jet is observed at a distance of 5-7 calibers and further, as the jet expands, its concentration decreases as a result of dilution with oxygen. According to cross-sectional studies, the concentration of ozone in the center of the jet throughout the entire flow was established. Based on the results obtained, an empirical coefficient of expansion of the oxygen jet was developed to assess ozone productivity. It was established that when the discharge at the outlet of the blowing nozzle is at a distance of 40 calibers (which is the working height of the blowing lance relative to the level of the metal bath in the oxygen converter in industrial conditions), the ozone productivity along the length of the oxygen jet will be 15 mg/min, which, according to the authors, will be sufficient to activate oxidative processes in the converter bath.

Keywords: ozone, generation efficiency, oxygen blowing lance, oxygen blowing, gas jet, high-voltage discharge.

References

- [1] 2025 World Steel in Figures. [Online]. Available: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf>. Accessed on: July 10, 2025.
- [2] S. Ghosh, B.N. Bharath, and N.N. Viswanathan, "BOF process dynamics," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 128(1), pp. 1-17, 2018. doi: 10.1080/25726641.2018.1544331.
- [3] M. Alam, J. Naser, and G. Brooks, "Computational fluid dynamics simulation of supersonic oxygen jet behavior at steelmaking temperature," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 41, pp. 636-645, 2010. doi: 10.1007/s11663-010-9341-0.
- [4] K.S. Coley, "Progress in the kinetics of slag-metal-gas reactions, past, present and future," *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, vol. 49 (2), pp. 191-199, 2013. doi: 10.2298/JMMB121220017.
- [5] F. Vosmaer, *Ozone: its manufacture, properties and uses*, Leopold Classic Library, 2015.
- [6] D.B. Kholikulov, A.R. Aripov, N.B. Khujakulov, A.B. Buronov, and A.B. Azimova, "Extraction of metals by using ozone from residue solutions of metallurgical production," in *Proceedings of the II International Conference «Integrated Innovative Development of the Zarafshan Region: Achievements, Problems and Prospects»*, Navoi, Uzbekistan, Nov. 27-28, 2019, pp. 65-68.

- [7] B. Langlais, D.A. Reckhow, and D.R. Brink, Eds. *Ozone in water treatment: Application and engineering*. 1991. doi: **10.1201/9780203744635**.
- [8] L.H. Wen, P.M. Menon, and N.K. Choon, "Waste water treatment by micro air and ozone bubbles," *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 3(3), pp. 368-371, 2009.
- [9] M. Martinelli, F. Giovannangeli, S. Rotunno, C.M. Trombetta, and E. Montomoli, "Water and air ozone treatment as an alternative sanitizing technology," *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*, vol. 58(1), pp. E48-E52, 2017. doi: **10.7203/jo3t.3.4.2019.15426**.
- [10] Yu.I. Zhavoronkov, Yu.N. Davydov, B.N. Nikolaev, L.P. Klimov, and S.D. Zinchenko, "Sposob vyplavki stali" ["Method of steelmaking"], USSR Patent SU135471, Jan. 15, 1992. (Rus.).
- [11] F. Saidinik, and H. Behnejad, "Comparing oxidation of aluminum by oxygen and ozone using reactive force field molecular dynamics simulations," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 25, article 95, 2023. doi: **10.1007/s11051-023-05739-w**.
- [12] S.I. Semykin, T.S. Golub, L.S. Molchanov, S.O. Dudchenko, and V.V. Vakulchuk, "Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters," *Enerhotekhnologii ta resursozberezhennia – Energy Technologies & Resource Saving*, vol. 83(2), pp. 107-116, 2025. doi: **10.33070/etars.2.2025.09**.
- [13] S.I. Semykin, T.S. Golub, S.A. Dudchenko, and V.V. Vakulchuk, "Vysokotemperaturnoe issledovanie osobennostei produvki metallicheskoj vannы v LD konvertere cherez koltsevoe koaksialnoe soplo" ["A high-temperature study of the characteristics of metal bath blowing in a LD converter through an annular coaxial nozzle"], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 27(7-9), pp. 27-32, 2019. doi: **10.15407/steelcast2019.07.027**. (Rus.)
- [14] S.I. Semykin, T.S. Golub, S.A. Dudchenko, and V.V. Vakulchuk, "Vysokotemperaturnoe issledovanie osobennostei produvki metalla v konvertere cherez verhnuu kislородnuu furmu s koltsevim schelevym soplom" ["A high-temperature study of metal blowing characteristics in a converter through the top oxygen lance with an annular slot nozzle"], *Fundamentalnie y prykladnie problemi chernoi metallurhyi – Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, iss. 32, pp. 229-237, 2018. (Rus.)
- [15] S. Nijdam, J. Teunissen, and U. Ebert "The physics of streamer discharge phenomena," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 29, article 103001, 2020. doi: **10.1088/1361-6595/abaa05**.
- [16] A. Firsov, K.V. Savelkin, D.A. Yarantsev, and S.B. Leonov, "Plasma-enhanced mixing and flameholding in supersonic flow," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 373, article 20140337, 2015. doi: **10.1098/rsta.2014.0337**.
- [17] Z. Li, J. Li, S. Spooner, and S. Seetharaman, "Basic oxygen steelmaking slag: formation, reaction, and energy and material recovery," *Steel research international*, vol. 93 (3), article 2100167, 2022. doi: **10.1002/srin.202100167**.
- [18] Z.S. Li, M. Whitwood, S. Millman, and J. van Boggelen, "Dissolution of lime in BOS slag: from laboratory experiment to industrial converter," *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, vol. 41(2), pp. 112-120, 2014. doi: **10.1179/1743281213Y.0000000108**.

Стаття надійшла 28.08.2025

Стаття прийнята 15.09.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Дослідження особливостей розповсюдження озону за кисневим струменем, створеного високовольтним електричним розрядом на виході з продувної фурми / С. І. Семикін та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 51. С. 86-93. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344661>.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЛИТТЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ
ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ

Крейцер К.О.

канд. техн. наук, ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>, e-mail: dakerkir@gmail.com;

Козишкурт Є.М.

д-р філософії, ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>, e-mail: koziskurtevgen@gmail.com

У статті запропоновано комплексний підхід до вдосконалення технологічного процесу лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском, який базується на урахуванні динаміки пресування рідкого металу в межах формуювальної камери. Обґрунтовано теоретичні засади взаємозв'язку між режимами подачі розплаву, конфігурацією литникової системи, характеристиками сплаву Al-Si та механізмами формування внутрішньої структури виливків. Особливу увагу приділено впливу швидкості переміщення поршня, рівня тиску ущільнення, температурних градієнтів у прес-формі та фазовим переходам, що виникають у ході тверднення. Теоретичний аналіз базується на положеннях гідродинаміки, термодинаміки та механіки деформованого тіла, що дозволяє створити інтегровану модель процесу лиття як багатофакторної та нестабільної системи. У межах дослідження акцентовано на складності контролю заповнення порожнини форми при високих швидкостях та коротких циклах лиття, характерних для промислових ливарних систем. Встановлено, що динамічні характеристики потоку розплаву критично впливають на ризики формування таких дефектів, як газові включення, турбулентні шви, локалізована пористість і термічні тріщини. Теоретична модель, побудована з використанням методу скінченних елементів, дозволяє досліджувати просторово-часову еволюцію температурних полів, тиску, швидкості потоку та щільності тверднення у ключових зонах прес-форми. На основі моделювання розроблено низку теоретичних рекомендацій щодо варіативного регулювання швидкості поршня та ступеня стискування металу залежно від стадії заповнення. Показано, що впровадження принципів адаптивного термодинамічного керування, зокрема шляхом контролю тепловідведення через охолоджувачі канали прес-форми, забезпечує зменшення внутрішніх напружень, збереження однорідності структури та рівномірності охолодження по всьому об'єму виливка. Вдосконалений алгоритм управління циклом охолодження дозволяє мінімізувати час витримки перед відкриттям форми, скорочуючи тривалість виробничого циклу без втрати якості продукції. Узагальнені результати підтверджують ефективність запропонованого теоретичного підходу: за моделювальними розрахунками кількість дефектів може бути знижена на 30-40%, а щільність виливків – підвищена на понад 10% у порівнянні з традиційними технологічними картами. Запропонована система оптимізації параметрів лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском сприяє підвищенню технологічної надійності, енергоефективності та відтворюваності результатів, що особливо актуально у контексті цифровізації виробництва та впровадження концепцій «розумного лиття». Застосування динамічного моделювання у поєднанні з адаптивним керуванням відкриває нові можливості для створення саморегульованих систем лиття, здатних до самонавчання та автоматичної корекції параметрів у відповідь на зміну властивостей матеріалу чи зовнішніх умов.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, лиття під тиском, динаміка пресування, теоретичне моделювання, термодинаміка, скінченно-елементний аналіз, оптимізація процесу, адаптивне керування.

Постановка проблеми

Процес лиття алюмінієвих сплавів під тиском давно вважається технічно виправданим рішенням для масового виробництва тонкостінних і геометрично складних деталей. Утім, за всієї ефективності технології, вона залишається чутливою до навіть незначних збоїв у налаштуваннях – від швидкості руху поршня до перепадів температури в системі охолодження. Особливо критичним є етап заповнення форми, коли розплавлений метал поводить себе нестабільно: змінює траєкторію, охолоджується нерівномірно, втрачає тиск або утворює турбулентні потоки. У таких умовах будь-який конструктивний або температурний дисбаланс швидко трансформується у технологічний дефект. У виробничій практиці проблеми з пористістю, включеннями чи холодними швами виникають не через відсутність обладнання, а через складність передбачити, як

розплави поводитиметься в конкретному литтєвому вузлі. Більшість режимів задаються досвідним шляхом або ж копіюються з попередніх циклів – без глибокого урахування реальної гідродинаміки процесу. Це робить результат залежним не стільки від якості сплаву, скільки від рівня інтуїції оператора. Останні роки демонструють поступову зміну підходу. Замість роботи «наосліп» з'являються спроби спрогнозувати поведінку розплаву за допомогою моделювання [1-3] або керувати його рухом ще до контакту з формою, зокрема – через магнітогідродинамічні засоби [4]. Але ці рішення поки не масштабовані. Одні моделі дають результат лише при ідеалізованих умовах, інші не враховують змін у реальному середовищі виробництва. Проблема не в тому, що немає інструментів, – проблема в тому, що вони не адаптуються до конкретної ливарної задачі.

Тому сьогодні актуальним є питання розробки таких підходів до оптимізації, які б враховували не лише геометрію прес-форми чи марку сплаву, а й динаміку самого процесу: як рухається розплав, коли стикається зі стінками, як змінюється його температура й тиск залежно від швидкості подачі, а не навпаки. Це завдання лежить на межі інженерії, прикладної фізики та цифрового моделювання. Без його вирішення лиття залишатиметься напівемпіричною технологією навіть на сучасному обладнанні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Лиття під тиском є ключовим методом виготовлення виробів із термопластичних і термореактивних полімерів, який забезпечує високу точність геометрії, якість поверхні та ефективність масового виробництва. У межах цього процесу застосовуються різноманітні технологічні підходи – інжекційне, інжекційно-пресове, інжекційно-газове, інструційне, багатошарове та тонкостінне лиття, кожне з яких адаптоване до специфіки продукції, геометрії виробів і типу полімерного матеріалу. Використання спеціалізованих систем впровадження, контролю температури, тиску, а також відповідних систем охолодження й виштовхування дозволяє уникати дефектів, зменшувати цикл виробництва та підвищувати механічні характеристики відливок. Зокрема, тонкостінне лиття під тиском, що передбачає високу швидкість заповнення форми та екстремальні тиски, стало одним із провідних рішень для виготовлення корпусних елементів у телекомунікаційній, автомобільній та медичній галузях. Універсальність, масштабованість і високий ступінь автоматизації роблять лиття під тиском незамінним у сучасному інженерно-виробничому середовищі [1, 2]. У литті алюмінієвих сплавів під тиском найчастіше виникають проблеми саме на етапі заповнення форми. Це складний процес, і навіть незначні відхилення в температурі чи швидкості подачі металу можуть призвести до дефектів, зокрема до порожнин і неповного заповнення [5]. Щоб уникнути цих помилок, багато дослідників використовують математичні моделі. Вони допомагають передбачити, як поводитиметься розплав у формі залежно від її конструкції, температури, властивостей сплаву та інших параметрів. У роботах [3, 6] подано приклади симуляцій, які дають змогу точніше налаштувати процес. Дослідження [7, 8] також пропонують алгоритми, що допомагають підбирати режими лиття до початку виробництва, а не шляхом проб і помилок. В окремих публікаціях акцент зроблено на ролі тиску. Наприклад, у роботі [2] досліджено, як він впливає на утворення мікропорожнин, а в дослідженні [9] – як температура охолодження змінює щільність металу. Обидва чинники важливі й потребують спільного аналізу. Ще один напрям досліджень – це спрощене моделювання. У статті [3] описано метамоделі, які дають попередню оцінку якості лиття без проведення повного розрахунку. Такі підходи зручні на підготовчих етапах. У

роботах [4, 10] розглянуто нестандартне рішення – вплив на потік розплаву ще до того, як він потрапить у форму. Це можливо завдяки магнітогідродинамічному керуванню. Така технологія допомагає стабілізувати подачу й зменшити ризик утворення дефектів. Для оцінки результату лиття найчастіше враховують повноту заповнення, кількість дефектів, рівномірність структури та витрати енергії [1, 11]. Зустрічаються також роботи, де запропоноване автоматичне регулювання процесу лиття в реальному часі на основі моделей [5, 6].

Таким чином, попри вже досягнутий значний прогрес, залишається актуальним питання про узгодження між симуляцією, реальними параметрами машинного обладнання та фізико-хімічними властивостями сплаву. Особливої уваги потребує проблема стабільності процесу в умовах швидкозмінного теплового навантаження та нерівномірного тиску у формоутворювальному просторі.

Мета статті

Метою статті є наукове обґрунтування та розроблення інтегрованого підходу до оптимізації параметрів лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском шляхом моделювання просторово-часової динаміки процесу пресування, удосконалення алгоритмів керування швидкістю руху поршня й температурними режимами, що забезпечує зниження дефектності виливків, підвищення їх щільності та стабільність технологічного циклу.

Виклад основного матеріалу

Щоб покращити лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском, потрібно враховувати, як поводить себе розплав у формі під час упресування. Це швидкий і складний процес: багато факторів змінюються одночасно, і кожен може вплинути на якість виробу. Тому в дослідженні застосовано методи CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics) і МСЕ-аналізу (метод скінченних елементів), що об'єднують гідродинаміку, теплообмін та кристалізацію металу. Моделювання виконано в середовищі ProCAST 2024 із використанням модуля Solidification, який забезпечує розрахунок теплових потоків і фазових переходів. Для перевірки отриманих результатів проведено контрольне порівняння з ANSYS Fluent (solver pressure-based, transient regime).

Геометрія моделі відповідала типовій прес-формі для алюмінієвого зливка масою 0,8 кг із товщиною стінки 3-6 мм, об'ємом порожнини 320 см³ та діаметром плунжера 45 мм. Сітка мала близько 1,2 млн елементів із локальним згущенням у зоні литникового входу; критерій збіжності – 10⁻³ за енергією та швидкістю. Граничні умови включали температуру розплаву 690°C на вході, температуру форми 200°C, теплообмінні коефіцієнти 900-1200 Вт/(м²·К), а також вільний вихід газів на вентиляційних каналах.

У процесі лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском важливу роль відіграє швидкість руху поршня,

оскільки саме вона визначає характер заповнення форми розплавом. Якщо поршень рухається занадто швидко – понад 40 м/с – у потоці металу виникають вихори, які захоплюють повітря та спричиняють утворення пасток у литниковій системі. Ці включення згодом стають джерелом дефектів у структурі виливка. Натомість, у разі уповільнення руху до 25-30 м/с заповнення форми відбувається більш рівномірно, але зростає ризик передчасного затвердіння розплаву, особливо в тонкостінних зонах, що вимагає термодіагностики. Для кількісної оцінки впливу параметрів процесу введено метрику Defect Ratio (DR, %) – частку об'єму з порами або газовими включеннями, отриману за результатами CFD-постпроцесингу. Щоб наочно проілюструвати залежність кількості повітряних пасток від швидкості поршня, нижче подано графік (рис. 1).

На рисунку 1 показано залежність кількості повітряних пасток у виливку від швидкості переміщення поршня під час лиття алюмінієвого сплаву під високим тиском. За результатами моделювання видно, що при швидкості понад 40 м/с кількість пасток різко зростає, що пов'язано з інтенсивним утворенням турбулентних зон і захопленням повітря в каналах литникової системи. У діапазоні 25-30 м/с кількість дефектів є мінімальною, що свідчить про стабільне та рівномірне заповнення форми. Занадто повільний рух (<25 м/с) також небажаний, оскільки спричиняє передчасне твердіння розплаву в окремих зонах. Отже, оптимальним визнано інтервал швидкості 28-35 м/с, який мінімізує DR до 2,8-3,4%.

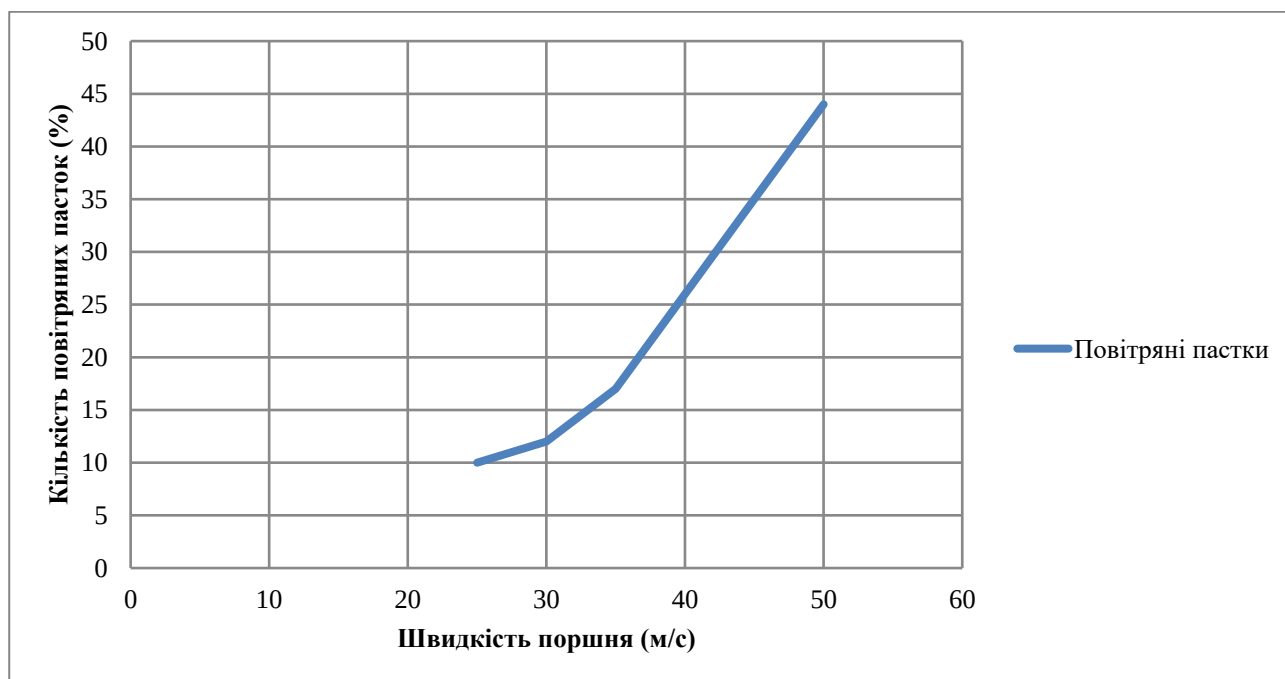


Рис. 1 – Вплив швидкості поршня на формування повітряних пасток

На рисунку 2 показано зміну рівня дефектності DR (%) залежно від частки затвердіння f_{solid} при різних швидкостях плунжера. Видно, що оптимальна швидкість 30 м/с забезпечує мінімальний рівень дефектності в інтервалі 40-80 % твердіння, тоді як за 25 м/с і 35 м/с спостерігаються відповідно дефекти через локальне переохолодження або турбулентність.

На наступному етапі досліджено тиск ущільнення. Моделювання показало, що підвищення тиску до 90-110 МПа забезпечує максимальну щільність виливка ($\rho = 2,67-2,70$ г/см³). Якщо тиск знижується до 80 МПа і менше, у центрі виробу з'являється на 30-35% більше пористих зон (рис. 3).

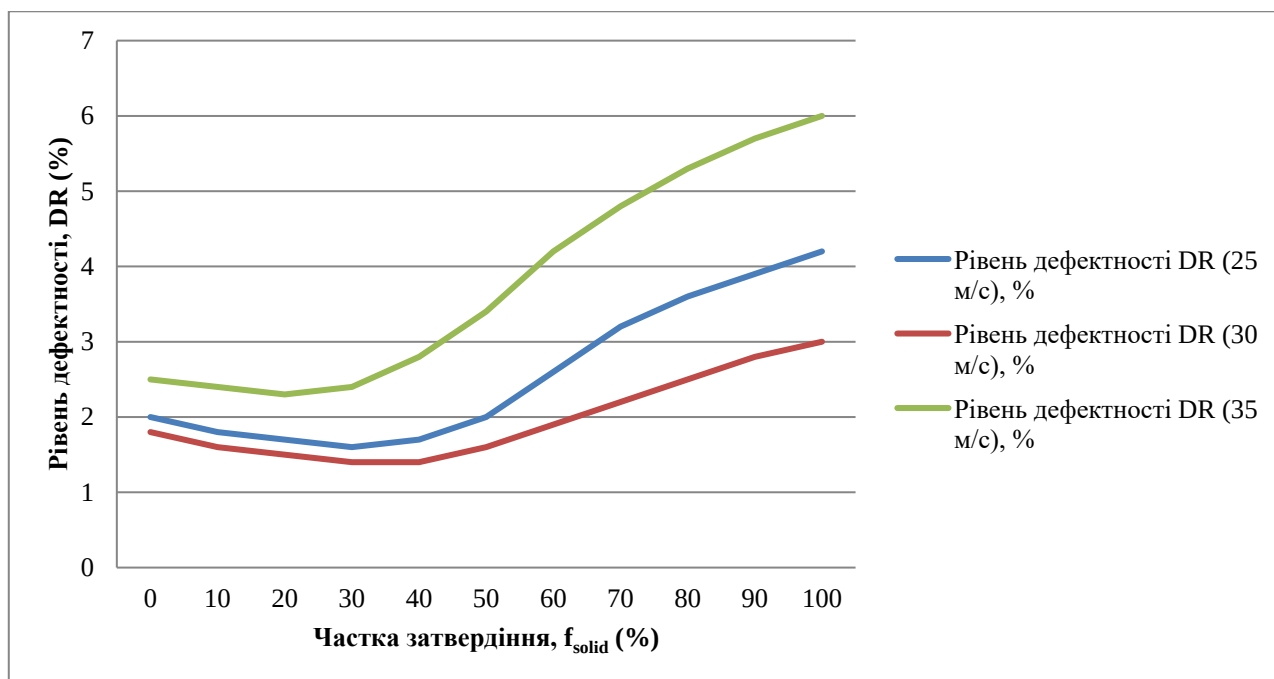
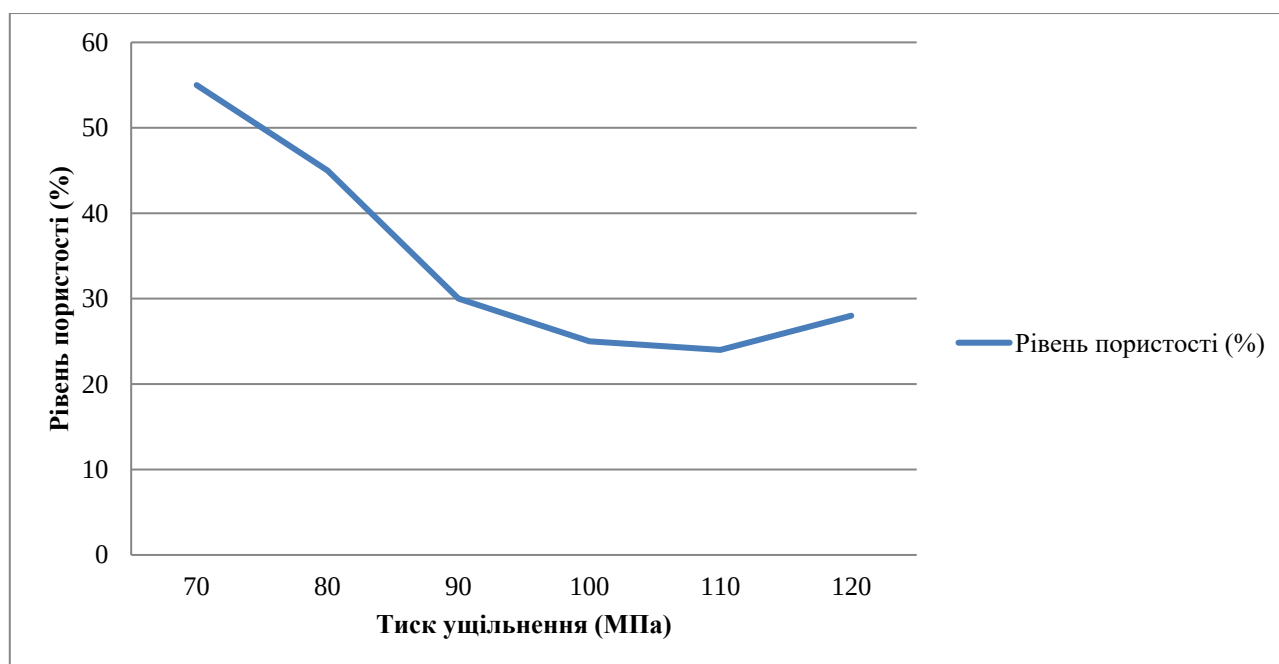
Рис. 2 – Залежність рівня дефектності DR від частки затвердіння f_{solid} при різних швидкостях руху плунжера

Рис. 3 – Рівень пористості при різному тиску ущільнення

Для кожного сценарію проведено температурно-деформаційний аналіз кристалізації з використанням моделі теплопровідності Fourier–Kirchhoff та коефіцієнтів для $AlSi_9Cu_3$: теплопровідність = 145 Вт/(м·К), теплоємність = 960 Дж/(кг·К), густина = 2680 кг/м³, в'язкість = $1,24 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Температурний режим у прес-формі також має велике значення. Коли температура в центрі значно

вища, ніж на краях (понад 120°C різниці), у металі накопичуються внутрішні напруження, що можуть призвести до тріщин. Коли охолодження вдається тримати рівномірним (у межах ± 5 °C), середній рівень внутрішніх напружень становить 18-22 МПа (табл. 1), що позитивно позначається на якості виробу.

Таблиця 1

Температурні перепади й напруження у стінках форми	
Температурна різниця, °C	Середній рівень внутрішніх напружень, МПа
<5	5–7
5-20	7-12
20-60	12-16
60-120	16-18
>120	18-22

На основі отриманих результатів визначено параметри оптимізації: швидкість плунжера, тиск ущільнення, температуру прес-форми та тривалість охолодження. Функцію мети сформульовано як мінімізацію інтегрального показника дефектності $J = \alpha \cdot DR + \beta \cdot (E/E_0)$, де α і β – вагові коефіцієнти, E – енерговитрати, E_0 – базове значення.

Було запропоновано адаптивний закон керування рухом плунжера: спочатку розгін до 35 м/с, потім стабілізація на рівні 30 м/с, а в кінці – короткий тиск

ущільнення зі швидкістю 20 м/с. Це зменшує ризик порожнин і тріщин у завершальній фазі лиття.

Для контролю охолодження застосовано адаптивну систему керування охолоджувальними каналами, яка змінює подачу охолоджувальної рідини залежно від температури в різних зонах. Це дозволило скоротити час очікування перед відкриттям форми на 12-15%, а загальний виробничий цикл – у середньому на 9 секунд (табл. 2).

Таблиця 2

Ефективність адаптивного охолодження (час циклу, енерговитрати)			
Параметр	До впровадження	Після впровадження	Зміна
Час витримки перед відкриттям форми, с	80	68	-15%
Загальний виробничий цикл, с	115	106	-9 с
Енерговитрати на цикл, ум. од.	100	92,5	-7,5%

Результати роботи пройшли промислову апробацію на лініях високотискового лиття у «BAMAX Poland Sp. z o.o» (Польща) та у Державному підприємстві «Інженерний центр литва під тиском» (Україна). Порівняння експериментальних і чисельних даних показало розбіжність не більше $\pm 6\%$ за основними метриками – щільністю, пористістю та температурним полем, що підтверджує адекватність побудованої моделі. Моделювання процесу показало суттєві технічні зміни в якості виливків і параметрах виробництва. Кількість дефектів – зокрема пористості та зон неповного заповнення – зменшилась у середньому на 30-40 %. Це пов'язано з узгодженим режимом подачі розплаву та регулюванням тиску в ключових фазах заповнення форми. Одночасно відзначено підвищення щільності структури на 10,4%, що свідчить про рівномірне тверднення і зменшення внутрішніх порожнин у виливках. Завдяки кращому контролю температури охолоджувальних каналів, зменшено енерговитрати на цикл приблизно на 7,5%, без погіршення якості. Температурне поле у зонах із підвищеним навантаженням стабілізувалося до рівня коливань не більше $\pm 2^\circ\text{C}$, що знижує ризик утворення тріщин і підвищує довговічність прес-форми. Такі результати підтверджують практичну ефективність адаптивного керування процесом у промисловому середовищі. Визначено межі застосовності моделі: оптимізація справджується для сплавів AlSi_7Mg ,

AlSi_9Cu_3 і AlSi_{12} при тиску 80-120 МПа. Подальші дослідження планується провести для вакуум-HPDC-систем і порівняти поведінку різних Al-Si сплавів.

Цей підхід працює не за жорстко заданими параметрами, а підлаштовується під реальні умови кожного циклу. Це особливо важливо, коли змінюється склад сплаву, зношується форма чи коливається температура в цеху. Така система дає змогу створювати «розумне» лиття – адаптивне й здатне самостійно реагувати на зміни без втручання оператора.

Висновки

Чисельне моделювання показало, що якість виливків із алюмінієвих сплавів тісно залежить від режимів подачі розплаву, рівня ущільнення та температурного стану прес-форми. Варіативне керування швидкістю поршня залежно від фази заповнення дало змогу скоротити кількість дефектів, пов'язаних із пористістю та неповним заповненням, у середньому на 30-40%. Щільність виливків зросла на 10,4%, що свідчить про рівномірніше ущільнення металу на етапі тверднення.

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні та реалізації адаптивного закону керування швидкістю плунжера й температурними режимами лиття під високим тиском, який поєднує CFD-моделювання, метод скінченних елементів і зворотний зв'язок від температурних сенсорів у реальному часі. Запропонований

підхід дозволив вперше сформулювати порогові сценарії керування фазами заповнення, ущільнення та охолодження, що забезпечують мінімізацію дефектності без зниження продуктивності.

Розроблена модель охоплює фізичні процеси гідродинаміки, теплообміну та кристалізації, а також враховує вплив в'язкості, теплоємності, густини й теплопровідності сплаву AlSi_9Cu_3 на швидкість затвердіння та формування внутрішніх напружень. Валідація на промисловій лінії HPDC CLH-450 підтвердила збіжність моделі з експериментом у межах $\pm 6\%$, що свідчить про достовірність результатів.

Практичне значення роботи полягає у створенні прототипу «розумної» системи керування литтям, здатної в режимі реального часу змінювати параметри процесу відповідно до температурних і тискових коливань. Це дає змогу підвищити стабільність якості виливків, зменшити енерговитрати на 7,5%, а тривалість виробничого циклу – на 9 секунд без втрати механічних характеристик.

Система адаптивного охолодження, побудована на моніторингу температурного профілю, забезпечила стабільність у критичних зонах форми. Коливання температури вдалося знизити до меж $\pm 2^\circ\text{C}$, що зменшило ймовірність появи термічних тріщин і підвищило довговічність прес-форми. Одночасно відзначено зменшення енерговитрат на 7,5% і скорочення тривалості виробничого циклу на 9 секунд без втрати якості.

Межі застосовності отриманих результатів охоплюють сплави систем Al-Si (зокрема AlSi_7Mg , AlSi_9Cu_3 , AlSi_{12}) у діапазоні тисків 80-120 МПа. Для сплавів із вищим умістом Cu або Mg потрібна корекція коефіцієнтів теплообміну та в'язкості.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні моделі на вакуумні HPDC-системи, оцінці енергетичної ефективності адаптивного керування в багатоканальних формах та порівнянні поведінки різних Al-Si-Cu систем у контексті високочастотного охолодження. Окрему увагу планується приділити інтеграції сенсорних даних у систему цифрового двійника процесу лиття.

Отримані результати підтверджують, що перехід від фіксованих технологічних параметрів до керування, яке реагує на реальні умови процесу, дозволяє підвищити надійність лиття. Такий підхід відкриває можливості для створення самоналаштовуваних виробничих систем, де керування технологічним процесом відбувається на основі поточних даних, а не за попередньо заданими шаблонами.

Перелік використаних джерел

- [1] A novel approach to optimize mechanical properties for aluminium alloy in high pressure die casting (HPDC) process combining experiment and modelling / K. Dou et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 296. Article 117193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117193>.
- [2] Effect of casting pressure on porosity, microstructure, and mechanical properties of large die casting aluminium alloy parts / J. Yang et al. *International Journal of Metalcasting*. 2025. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-025-01641-4>.
- [3] Metamodels' development for high pressure die casting of aluminium alloy / Anglada E., Boto F., García de Cortazar M., Garmendia I. *Metals*. 2021. Vol. 11(11). Article 1747. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11111747>.
- [4] Фіксен В. М., Карпукін Є. О. Технології лиття та приготування алюмінієвих сплавів за допомогою засобів магнітної гідродинаміки. *Метал та лиття України*. 2024. № 32(1). Pp. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.01.002>.
- [5] Die casting die design and process optimization of aluminium alloy gearbox shell / Huang M., Zhou Q., Wang J., Li S. *Materials*. 2021. Vol. 14(14). Article 3999. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14143999>.
- [6] Martínez-Pastor J., Hernández-Ortega J.J., Zamora R. A decision support system (DSS) for the prediction and selection of optimum operational parameters in pressure die-casting processes. *Materials*. 2022. Vol. 15(15). Article 5309. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15155309>.
- [7] Optimization of process parameters during pressure die casting of A380: a silicon-based aluminium alloy using GA & fuzzy methodology / Gupta A.K., Kumar S., Chandna P., Bhushan G. *Silicon*. 2021. Vol. 13(8). Pp. 2429-2443. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00594-z>.
- [8] Suthar J., Persis J., Gupta R. Critical parameters influencing the quality of metal castings: a systematic literature review. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2023. Vol. 40(1). Pp. 53-82. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-11-2020-0368>.
- [9] Accurate simulation of complex temperature field in counter-pressure casting process using A356 aluminium alloy / Tian Y., Yang D., Jiang M., He B. *International Journal of Metalcasting*. 2021. Vol. 15(1). Pp. 259-270. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00456-9>.
- [10] Сучасні магнітодинамічні технології для виготовлення безперервно литих зливків з алюмінієвих сплавів / А.В. Нарівський та ін. *Метал та лиття України*. 2024. № 32(3-4). С. 66-71. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.03-04.008>.
- [11] Design of non-heat treatable high pressure die casting Al alloys: a review / H. Zhu et al. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024. Vol. 33(17). Pp. 8601-8626. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09477-5>.

OPTIMIZATION OF HIGH-PRESSURE DIE CASTING PARAMETERS
FOR ALUMINUM ALLOYS CONSIDERING PRESSING DYNAMICS

Kreitser K.O.

PhD (Engineering), senior lecturer, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>, e-mail: dakerkir@gmail.com;

Kozishkurt Ye.M.

PhD, senior lecturer, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>, e-mail: koziskurtevgen@gmail.com

In the article a comprehensive approach is proposed to improve the technological process of high-pressure die casting of aluminum alloys, which considers the dynamics of molten metal pressing within the mold-forming chamber. This work substantiates the theoretical foundations of the interdependence between melt feed regimes, gating system configuration, Al-Si alloy characteristics, and the mechanisms of internal structure formation in castings. Particular attention is paid to the influence of piston movement speed, compression pressure level, thermal gradients in the die, and phase transitions occurring during solidification. The theoretical analysis is based on the principles of hydrodynamics, thermokinetics, and deformable body mechanics, enabling the creation of an integrated model of the casting process as a multifactorial and unstable system. The study emphasizes the complexity of cavity filling control at high injection speeds and short casting cycles, which are typical for industrial foundry systems. It has been established that the dynamic characteristics of the molten metal flow critically affect the risks of defects such as gas entrapment, turbulent weld lines, localized porosity, and thermal cracking. A theoretical model based on the finite element method was developed to investigate the spatio-temporal evolution of temperature fields, pressure, flow velocity, and solidification density in key areas of the die. Based on this modeling, a set of theoretical recommendations was developed for the variable regulation of piston speed and metal compression rate depending on the stage of cavity filling. It is demonstrated that implementing adaptive thermokinetic control principles – in particular, managing heat dissipation through cooled channels in the die – enables the reduction of internal stresses, preservation of structural homogeneity, and uniform cooling across the entire casting volume. The improved cooling cycle control algorithm minimizes the holding time before die opening, thereby reducing the production cycle duration without compromising product quality. The summarized results confirm the effectiveness of the proposed theoretical approach: modeling calculations show that defect rates can be reduced by 30–40%, and casting density increased by more than 10% compared to conventional process maps. The proposed system for optimizing high-pressure die casting parameters of aluminum alloys enhances technological reliability, energy efficiency, and result reproducibility – which is especially relevant in the context of production digitalization and the implementation of “smart casting” concepts. The integration of dynamic modeling with adaptive control opens new possibilities for creating self-regulating casting systems capable of self-learning and automatic parameter correction in response to material property changes or external conditions.

Keywords: aluminum alloy, high-pressure die casting, pressing dynamics, theoretical modeling, thermokinetics, finite element analysis, process optimization, adaptive control.

References

- [1] K. Dou, E. Lordan, Y. Zhang, A. Jacot, and Z. Fan, “A novel approach to optimize mechanical properties for aluminium alloy in high pressure die casting (HPDC) process combining experiment and modelling,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 296, article 117193, 2021. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117193.
- [2] J. Yang, et al., “Effect of casting pressure on porosity, microstructure, and mechanical properties of large die casting aluminum alloy parts,” *International Journal of Metalcasting*, pp. 1-15, 2025. doi: 10.1007/s40962-025-01641-4.
- [3] E. Anglada, F. Boto, M. García de Cortazar, and I. Garmendia, “Metamodels’ development for high pressure die casting of Aluminum Alloy,” *Metals*, vol. 11, no. 11, article 1747, 2021. doi: 10.3390/met11111747.
- [4] V.M. Fikssen, and Ye.O. Karpukhin, “Tekhnolohiyi lytia ta pryhotuvannya alyuminiyevykh splaviv za dopomohoiu zasobiv mahnetnoi hidrodynamiky” [“Technologies of casting and preparation of aluminum alloys using magnetohydrodynamics tools”], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 32, no. 1, 2024. doi: 10.15407/steelcast2024.01.002. (Ukr.)
- [5] M. Huang, Q. Zhou, J. Wang, and S. Li, “Die casting die design and process optimization of aluminum alloy gearbox shell,” *Materials*, vol. 14, no. 14, article 3999, 2021. doi: 10.3390/ma14143999.
- [6] J. Martínez-Pastor, J.J. Hernández-Ortega, and R. Zamora, “A decision support system (DSS) for the prediction and selection of optimum operational parameters in pressure die-casting processes,” *Materials*, vol. 15, no. 15, article 5309, 2022. doi: 10.3390/ma15155309.
- [7] A.K. Gupta, S. Kumar, P. Chandna, and G. Bhushan, “Optimization of process parameters during pressure die casting of A380: a silicon-based aluminium alloy using GA & fuzzy methodology,” *Silicon*, vol. 13, no. 8, pp. 2429-2443, 2021. doi: 10.1007/s12633-020-

00594-z.

- [8] J. Suthar, J. Persis, and R. Gupta, "Critical parameters influencing the quality of metal castings: a systematic literature review," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 40, no. 1, pp. 53-82, 2023. doi: 10.1108/IJQRM-11-2020-0368.
- [9] Y. Tian, D. Yang, M. Jiang, and B. He, "Accurate simulation of complex temperature field in counter-pressure casting process using A356 aluminum alloy," *International Journal of Metalcasting*, vol. 15, no. 1, pp. 259-270, 2021. doi: 10.1007/s40962-020-00456-9.
- [10] A.V. Narivskiy, S.L. Polyvoda, M.M. Voron, V.Ya.O. Tverdokhvalov, A.Yu. Semenko, and O.V. Siry, "Suchasni mahnetodynamichni tekhnolohiyi dlya vyhotovlennya bezperervno lytukh zlyvkiv z alyuminiyevykh splaviv" ["Modern magnetodynamic technologies for the production of continuously cast aluminum alloy ingots"], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 32, no. 3-4, pp. 66-71, 2024. doi: 10.15407/steelcast2024.03-04.008. (Ukr.)
- [11] H. Zhu, C. Xia, H. Zhang, D. Zhao, M. Wang, and H. Wang, "Design of non-heat treatable high pressure die casting Al alloys: A review," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 33, no. 17, pp. 8601-8626, 2024. doi: 10.1007/s11665-024-09477-5.

Стаття надійшла 03.08.2025

Стаття прийнята 28.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Крейцер К. О., Козішкурт Є. М. Оптимізація параметрів лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском з урахуванням динаміки процесу пресування. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 51. С. 94-101. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344670>.

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

UKD 621.316.11:621.67

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344729

MATEMATYCZNE MODELOWANIE AUTOMATYCZNEJ STABILIZACJI CIŚNIENIA GŁÓWNYCH PRZEPOMPOWNI Z ASYNCHRONICZNYM NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM POMP ODŚRODKOWYCH

Lysiak V.H.

kandydat nauk technicznych, docent, Uniwersytet Narodowy «Politechnika Lwowska»,
Lwów, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8371-6455>, e-mail: vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua;

Dyda R.B.

doktorant, Uniwersytet Narodowy «Politechnika Lwowska», Lwów, ORCID:
<https://orcid.org/0009-0009-0765-3745>, e-mail: roman.b.dyda@lpnu.ua

Artykuł poświęcony jest opracowaniu modelu matematycznego sterowanej potężnej przepompowni z automatyczną stabilizacją ciśnienia. Celem pracy jest zwiększenie efektywności procesu transportu cieczy rurociągami magistralnymi i dystrybucyjnymi. Proponowany model o porównywalnym poziomie szczegółowości opisuje podsystemy elektromechaniczne i hydrauliczne jako jedną całość. Parametry modelu pompy odśrodkowej obliczane są na podstawie geometrii i wymiarów jej elementów, z uwzględnieniem wpływu właściwości fizycznych cieczy roboczej. Umożliwia to kompleksowe badanie takich obiektów bez fizycznego na nie oddziaływania, z uwzględnieniem wzajemnej zależności obu podsystemów oraz zmian parametrów elementów podsystemu hydraulicznego. W artykule zaproponowano kierunki wykorzystania i sposoby rozszerzenia funkcjonalności opracowanego modelu.

Słowa kluczowe: model matematyczny, pompa odśrodkowa, przepompownia, rurociąg, silnik indukcyjny, system sterowania.

Sformułowanie problemu

Potężne przepompowni (PS) dla głównych rurociągów (PL) i dużych PL dystrybucyjnych mają strategiczne znaczenie. Zapewniają one ruch dużych objętości cieczy [[1]] i składają się z nierozdzielnie powiązanych podsystemów elektromechanicznych i hydraulicznych. Nadmierne zużycie energii elektrycznej spowodowane nieoptymalnym reżimem działania poszczególnych potężnych agregatów, nieoptymalną liczbą agregatów o mniejszej mocy, jak również podczas procesów przejściowych, jest dość znaczące. Według [[2]] mogą one stanowić 14% całkowitego zużycia energii przez PS. Według tych samych danych, w ciągu zaledwie jednej doby na głównej PS ropy naftowej może wystąpić do 16 przełączeń agregatów pompowych (AP). Nadmierne zużycie energii elektrycznej w PS prowadzi również do znacznego wzrostu strat energii elektrycznej w elementach sieci elektroenergetycznych [[3]]. Wysokie koszty energii elektrycznej i sprzętu, a także niedopuszczalność wyłączeń sprzętu, utrudniają, a często uniemożliwiają, przeprowadzanie eksperymentów fizycznych przy potężnych PS. Dlatego też istotny jest rozwój narzędzi komputerowych, pozwalających na prognozowanie reżimów działania, rozpoznawanie usterek w sprzęcie oraz automatyczne sterowanie systemami eksploatacji takich obiektów.

Analiza najnowszych badań i publikacji

Analiza najnowszych badań i publikacji. Jednym z zadań sterowania reżimami działania PS jest utrzymanie

stałego ciśnienia w danym węźle podsystemu hydraulicznego przy różnych poziomach zużycia cieczy. Najczęstszymi metodami takiego sterowania są przełączanie AP i zmiana warunków pracy pomp (CP). To ostatnie można zrealizować zarówno poprzez zmianę charakterystyki sieci hydraulicznej (za pomocą przepustnicy lub obejścia), jak i poprzez regulację częstotliwościową silników agregatów. Zastosowanie przepustnicy lub obejścia powoduje zmniejszenie wydajności pompowania. Maksymalną efektywność energetyczną działania PS można uzyskać poprzez łączenie przełączania agregatów i sterowania częstotliwością jednego z nich. Taki system sterowania i jego algorytm działania przedstawiono w [[4]]. Jednak jego funkcjonalność ogranicza się wyłącznie do ustalonych reżimów działania. Ponadto, aby ustabilizować ciśnienie, mierzony jest jedynie objętościowy przepływ cieczy roboczej. Nie jest to skuteczne w przypadku stabilizacji ciśnienia w dynamicznych reżimach działania. W modelu [[5]] nie występują ograniczenia tego typu. Natomiast sieć hydrauliczna i CP są reprezentowane przez wielomiany aproksymacyjne. Uniemożliwia to badanie procesów zachodzących w podsystemie hydraulicznym. Większość innych prac poświęconych PS (np. [[6]], [[7]], [[8]], i [[9]]) charakteryzuje się również niezwykle uproszczoną reprezentacją jednego lub obu podsystemów. Model matematyczny [[10]] uogólnionego PS z asynchronicznym napędem elektrycznym CP pozbawiony jest tych niedociągnięć. W tym modelu opis matematyczny CP opiera się na metodzie analogii elektrohydrodynamicznych. Metoda polega na obliczeniu

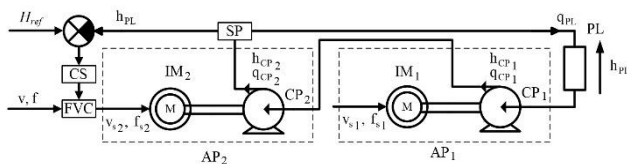
parametrów modelu CP na podstawie wymiarów geometrycznych jej elementów [[11]]. Umożliwia to uwzględnienie wpływu zmian eksploatacyjnych i awaryjnych parametrów wewnętrznych CP na reżimy działania PS. Model pozwala na zbadanie wzajemnego wpływu procesów i parametrów elektromechanicznych i hydraulicznych. Nie posiada jednak żadnego systemu sterowania.

Wyznaczanie zadania

Celem niniejszej pracy jest rozszerzenie funkcjonalności opracowanych wcześniej przez autora modeli poprzez uzupełnienie ich o system automatycznego sterowania, zwiększający efektywność procesu transportu cieczy przez magistrale i duże rurociągi dystrybucyjne.

Prezentacja materiału głównego

Schemat blokowy PS z zamkniętym systemem sterowania pokazano na rysunku 1. Dwa agregaty pompowe są połączone hydraulicznie szeregowo: podoporowy (AP₂). Agregat główny zapewnia wymagane ciśnienie w danym zakresie przepływu cieczy roboczej. Jego ciśnienie jest 5-10 razy większe od ciśnienia agregatu podoporowego, a jest on znacznie droższy.



Rys. 1 – Schemat strukturalny PS

Łopatkki CP są bardzo wrażliwe na kawitację hydrodynamiczną, która je niszczy. Badania eksperymentalne [[12]] i teoretyczne [[13]] poświęcone są wczesnemu wykrywaniu kawitacji na łopatkach CP. Aby zapobiec kawitacji, stosuje się agregatu podoporowego. On wytwarza niewielkie, stałe ciśnienie na wlocie do głównej CP i zapewnia objętość przepływu nie mniejszą niż jednostka główna. Aby ustabilizować ciśnienie PS w wymaganym zakresie H_{ref} , wykorzystuje się aktualną wartość ciśnienia na wlocie do PL. Pomiaru dokonuje się za pomocą czujnika ciśnienia SP. Z wyjścia regulatora PI o parametrach P , I , sygnał podawany jest do systemu sterowania CS. Zapewnia, że przetwornik częstotliwości i napięcia FVC kształtuje częstotliwość f_{s2} napięcia zasilania IM agregatu głównego. Napięcie V_{s2} zasilania silnika indukcyjnego (IM) agregatu głównego kształtowane jest w oparciu o zasadę proporcjonalnej regulacji częstotliwości IM $V_{s2} / f_{s2} = const$. Zakłada się, że obu agregatów zasilane są ze źródeł napięcia trójfazowego symetrycznego, niezawierających wyższych

harmonicznych. Napięcie V_{s1} i częstotliwość f_{s1} napięcia zasilania IM agregatu podoporowego są stałe.

Równania modelu są zapisane w jednostkach na jednostkę.

Do zapisu równań IM zastosowano następujący system wartości bazowych: $\omega_{IM.b} = \omega_{syn}$;

$$V_{IM.b} = \sqrt{2/3} V_{IM.nom};$$

$$I_{IM.b} = \sqrt{2} P_{IM.nom} / (\sqrt{3} V_{IM.nom} \eta_{IM.nom} \cos \varphi_{IM.nom});$$

$$S_{IM.b} = (3/2) V_{IM.b} / I_{IM.b}; \quad T_{IM.b} = S_{IM.b} / \omega_{IM.b};$$

$$Z_{IM.b} = V_{IM.b} / I_{IM.b}, \quad \text{gdzie: } \omega_{syn}, V_{IM.nom}, P_{IM.nom},$$

$\eta_{IM.nom}$, $\cos \varphi_{IM.nom}$ – nominalne parametry paszportowe IM. Równania IM formułuje się na podstawie uogólnionych równań przekształtnika elektromechanicznego, uwzględniając następujące założenia: reżim temperaturowy jest stabilny, parametry uzwojenia są skoncentrowane; Charakterystyka Webera-Ampere'a systemu magnetycznego jest nieliniowa. Wpływ kształtu rdzenia na rozkład pola magnetycznego nie jest brany pod uwagę.

Do zapisu równań CP zastosowano następujący system wartości bazowych $\omega_{CP.b} = \omega_{CP.nom}$;

$$H_{CP.b} = H_{CP.nom}; \quad Q_{CP.b} = Q_{CP.nom}; \quad S_{CP.b} = \rho g H_{CP.b} Q_{CP.b};$$

$$T_{CP.b} = S_{CP.b} / \omega_{CP.b}; \quad Z_{CP.b} = \rho g H_{CP.b} / Q_{CP.b}, \quad \text{gdzie:}$$

$\omega_{CP.nom}$, $H_{CP.nom}$, $Q_{CP.nom}$ – nominalne parametry paszportowe CP, ρ , g – gęstość cieczy roboczej i przyspieszenie swobodnego spadku. W równaniach literą h oznacza wysokość pompowania, która w jednostkach na jednostkę jest równa ciśnieniu. Dlatego dla zwięzłości będziemy używać terminu «ciśnienie». Równania CP formułuje się na podstawie analogii elektrohydrodynamicznej według złożonego schematu równoważnego [[11]] biorąc pod uwagę następujące założenia: reżim temperaturowy jest stabilny, ciecz robocza jest jednorodna i ma stałą gęstość, wektory przedstawiające objętościowe natężenie przepływu i ciśnienie cieczy roboczej na wylocie wirnika są współliniowe. Wirnik IM, koło zamachowe CP oraz wał wspólny uważamy za całkowicie sztywne.

Jako wartość częstotliwości bazowej wspólną dla obu podsystemów przyjmujemy wartość częstotliwości bazowej IM: $\omega_b = \omega_{IM.b}$. Równania AP formułuje się w ortogonalnych współrzędnych $d-q$, które są sztywno połączone ze wspólnym wałem. Zmienne złożone wchodzące do równań są oznaczone kropką powyżej. Składowa rzeczywista odpowiada współrzędnej d , a składowa urojona odpowiada współrzędnej q . Dla wygody stosowania w systemach matematyki komputerowej równania różniczkowe rozwiązuje się względem pierwszych pochodnych.

$$\begin{pmatrix} \frac{di_s}{dt} \\ \frac{di_r}{dt} \\ \frac{d\psi_\delta}{dt} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_\sigma} - j\omega_s & 0 & -\frac{1}{L_\sigma} & -j\frac{\omega_s}{L_\sigma} \\ 0 & -\frac{\omega_s R_r}{L_\sigma} - j(\omega_s - \omega_r) & -\frac{\omega_s}{L_\sigma} & j\frac{\omega_s - \omega_r}{L_\sigma} \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -R_m(\psi_\delta) - j\frac{\omega_s}{R_a} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \\ \dot{e}_s \\ \dot{\psi}_\delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{v}_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{d\dot{q}_{11}}{dt} \\ \frac{d\dot{q}_{22}}{dt} \\ \frac{d\dot{q}_{33}}{dt} \\ \frac{d\dot{q}_{44}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r_{11}}{L_{11}} - \frac{r_{21}}{L_{12}} & \frac{r_{22}}{L_{12}} - \frac{r_{32}}{L_{13}} & \frac{r_{33}}{L_{13}} - \frac{r_{23}}{L_{12}} & 0 \\ \frac{r_{11}}{L_{21}} - \frac{r_{21}}{L_{22}} & \frac{r_{22}}{L_{22}} - \frac{r_{32}}{L_{23}} & \frac{r_{33}}{L_{23}} - \frac{r_{23}}{L_{22}} & 0 \\ \frac{r_{11}}{L_{31}} - \frac{r_{21}}{L_{32}} & \frac{r_{22}}{L_{32}} - \frac{r_{32}}{L_{33}} & \frac{r_{33}}{L_{33}} - \frac{r_{23}}{L_{32}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_{mech}(q_{PL})}{L_{mech}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{q}_{11} \\ \dot{q}_{22} \\ \dot{q}_{33} \\ \dot{q}_{44} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_{11}} \\ \frac{1}{L_{21}} \\ \frac{1}{L_{31}} \\ \frac{1}{L_{mech}} \end{pmatrix} \times \dot{h}_0; \quad (2)$$

$$\dot{h}_0 = H_{0,nom} \left(\frac{\omega_b}{\omega_{CP,b}} \right)^2 \omega_r^2 e^{j\omega_b \omega t}; \quad (3)$$

$$h_{CPd} q_{33q} - h_{CPq} q_{33d} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_\Sigma \omega_{IM,b}} \left[T_{IM,b} (\psi_{\delta d} i_{sq} - \psi_{\delta q} i_{sd}) - T_{CP,b} H_{0,nom} \frac{\omega_{IM,b}}{\omega_{CP,b}} \omega_r \sqrt{(q_{11d} + q_{44d})^2 + (q_{11q} + q_{44q})^2} \right]; \quad (5)$$

$$q_{33d_1}^2 + q_{33q_1}^2 = \left(\frac{Q_{CPb_2}}{Q_{CPb_1}} \right)^2 (q_{33d_2}^2 + q_{33q_2}^2); \quad (6)$$

$$q_{PL} = \sqrt{q_{33d_1}^2 + q_{33q_1}^2}; \quad (7)$$

$$h_{PL} = \sqrt{h_{CPd_1}^2 + h_{CPq_1}^2} + \frac{H_{CPb_2}}{H_{CPb_1}} \sqrt{h_{CPd_2}^2 + h_{CPq_2}^2}; \quad (8)$$

$$\frac{dq_{PL}}{dt} = -\frac{r_{PL}}{L_{PL}} q_{PL} + \frac{1}{L_{PL}} h_{PL} - \frac{1}{L_{PL}} h_{st}; \quad (9)$$

$$\frac{d\omega_{s_2}}{dt} = \frac{1}{2\omega_{s_2}} (I(H_{ref} - h_{PL}) - Py); \quad (10)$$

$$\frac{dh_{PL}}{dt} = y; \quad (11)$$

$$v_{sd_2} = \omega_{s_2}; \quad (12)$$

gdzie: t – czas, s; ω_s , ω_r – częstotliwość kołowa napięcia uzwojenia stojana IM i prędkość kołowa obrotu wspólnego wału; $\dot{v}_s$, $\dot{i}_s$, та $\dot{i}_r$ – są napięciem i prądem uzwojenia stojana, a także prądem uzwojenia wirnika IM zredukowanym do uzwojenia stojana; ψ_δ – strumień sprzężenia od strumienia magnetycznego szczeliny powietrznej IM, zredukowany do uzwojenia stojana; R_s , L_{os} , R_r , L_{or} , R_a – parametry IM; $\dot{h}_0$ – fikcyjna ciśnienie wyidealizowanego CP; $\dot{q}_{11}$, $\dot{q}_{22}$, $\dot{q}_{33}$, $\dot{q}_{44}$ – fikcyjne objętościowe natężenia przepływu cieczy CP; h_{PL} , q_{PL} , h_{st} – ciśnienie i natężenie przepływu objętościowego cieczy roboczej na wlocie PL; h_{st} – przeciwcisnienie statyczne p PL; $r_{mech}(q_{PL})$ – równoważny opór nieliniowy, uwzględniający straty dyssypatywne energii mechanicznej w CP w zależności od reżimu pompowania [[14]]; r_{11} , r_{12} , r_{13} , r_{21} , r_{22} , r_{23} , r_{31} , r_{32} , r_{33} , L'_{11} , L'_{12} , L'_{13} , L'_{21} , L'_{22} , L'_{23} , L'_{31} , L'_{32} , L'_{33} – opory hydrauliczne dyssypatywne i indukcyjne CP, które oblicza się z wymiarów jego elementów wewnętrznych według metody [[10]] i [[11]]; r_{PL} , L_{PL} – dyssypatywny opór hydrauliczny i indukcyjność hydrauliczna PL; J_Σ – moment inercji AP, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$. Reluktancję magnetyczną IM przedstawiono jako przybliżony wielomian, gdzie:

$$R_m(\psi_\delta) = I_{mn} (a_0 + a_2(\psi_{\delta l}^2 + \psi_{\delta q}^2) + a_4(\psi_{\delta l}^4 + \psi_{\delta q}^4)),$$

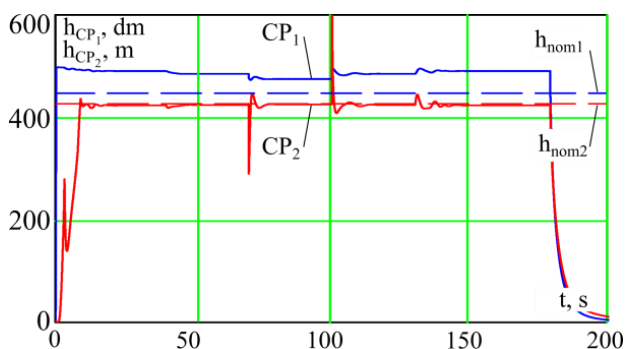
gdzie: $a_0 = 0.82$; $a_2 = 0.148$; $a_4 = 0.044$;
 $I_{mn} = 1/(\chi_\sigma + \chi_a)$ gdzie: χ_σ , χ_a – względne

indukcyjności upływu i magnesowania IM w reżimie nominalnym. W tym przypadku pomijamy wpływ częstotliwości na R_m , ponieważ staje się on istotny przy częstotliwościach powyżej 100 Hz [[15]].

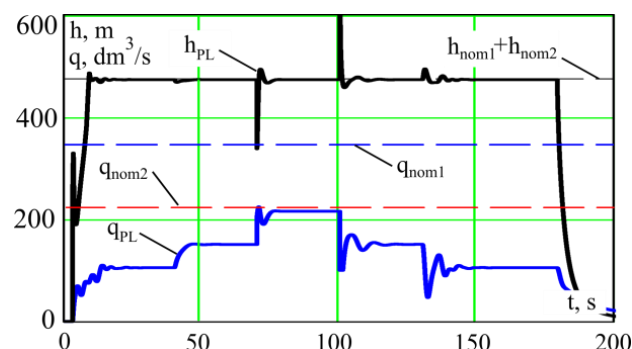
Należy zauważyć, że dysypatywny opór hydrostatyczny CP zależy nie tylko od jego wymiarów wewnętrznych, ale także od lepkości kinematycznej cieczy roboczej i jej gęstości. Lepkość kinematyczna cieczy zależy od temperatury. Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie wpływu warunków temperaturowych na reżimy działania PS. by zweryfikować wydajność i adekwatność modelu, przeprowadzono symulacje testowe reżimów działania PS. Główne wyniki symulacji testowej pokazano na rysunkach 2-7. Na tych rysunkach pokazano wykresy czasowe reżimów działania poszczególnych komponent agregatów oraz PS jako całości. Hydrauliczne wskaźniki reżimów działania pokazano na rysunkach 2 i 3 oraz elektromechaniczne – na rysunkach 4-7. Skład sprzętu podano w tabeli 1.

Tabela 1

Skład sprzętu		
Agregat (oznaczenie na schemacie)	Silnik indukcyjny (oznaczenie na schemacie)	Pomp odśrodkowa (oznaczenie na schemacie)
Podporowy (AP ₁)	4AN355M6U3 (IM ₁)	14NDs-N (CP ₁)
Główny (AP ₂)	AZMV- 1600/6000U2 (IM ₂)	4QG300-2-100b (CP ₂)



Rys. 2 – Ciśnienia CP, m

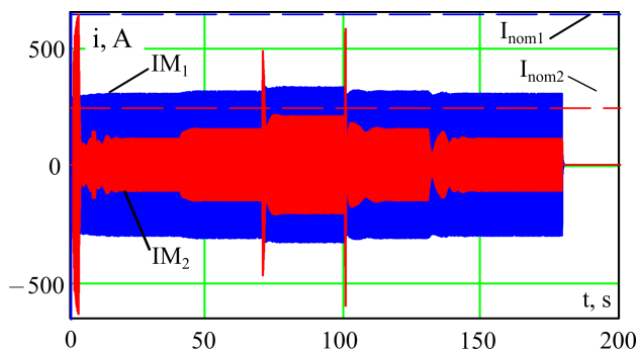


Rys. 3 – Ciśnienia i objętościowe przepływy cieczy roboczej PS i CP, dm³/s

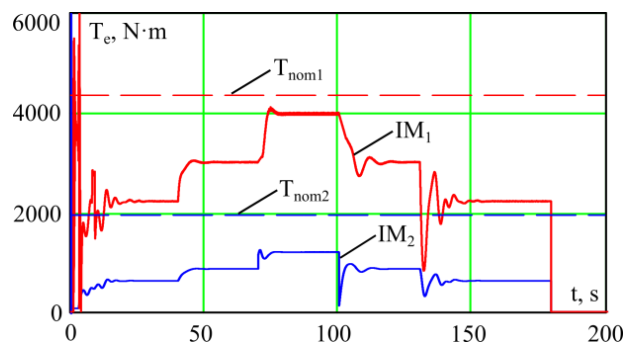
Rysunek 2 przedstawia ciśnienia (w różnych skalach) poszczególnych CP. Rysunek 3 przedstawia ciśnienie i objętościowy przepływy cieczy roboczej PS jako całości oraz objętościowy przepływ cieczy roboczej poszczególnych CP. Rysunek 4 przedstawia prądy fazowe

uzwojeń stojana IM. Rysunek 5 przedstawia momenty elektromagnetyczne IM.

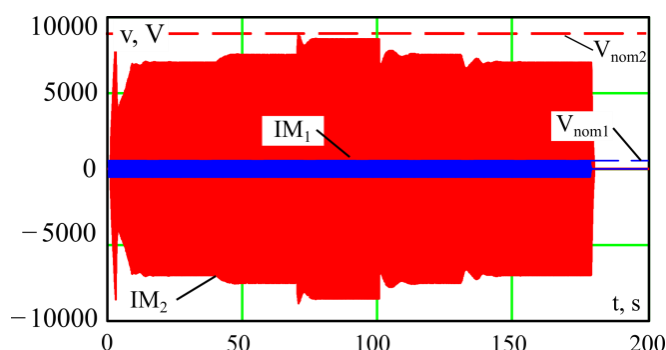
Rysunki 6 i 7 przedstawiają napięcia międzyfazowe uzwojeń stojana IM oraz częstotliwości tych napięć.



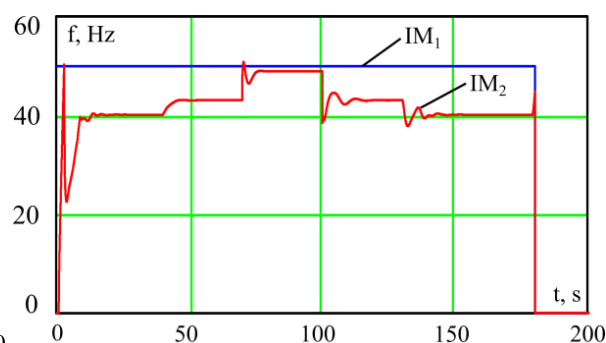
Rys. 4 – Prądy uzwojenia stojanów IM, A



Rys. 5 – Momenty elektromagnetyczne IM, N·m



Rys. 6 – Napięcia uzwojenia stojanów IM, V



Rys. 7 – Częstotliwości napięć uzwojenia stojanów IM, Hz

Na wykresach zaprezentowano również parametry nominalne katalogowe IM i CP. Symulację przeprowadzono przez 200 sekund. Zadane ciśnienie PS do ustabilizowania wynosiło 473 m. Było ono równo sumie nominalnych o ciśnien w CP podobnej (45 m) i CP głównej (428 m). Podczas symulacji parametry PL zmieniano pięciokrotnie. Po upływie 3 s PL został całkowicie zablokowany. Następnie natężenie przepływu płynu ustawiono na 105 dm³/s (47% nominalnego natężenia przepływu agregatu głównego). W chwilach 40 s i 70 s natężenie przepływu wzrastało każdorazowo o 43% od wartości poprzedniej – odpowiednio do 150 dm³/s i 215 dm³/s, a w chwilach 100 s i 130 s – zmniejszało się odpowiednio do 150 dm³/s i 105 dm³/s. W chwili 179 s nastąpiło przerwanie zasilania IM obu agregatów, w wyniku czego agregaty te zatrzymały się samoczynnie. Aby przetestować wydajność modelu, czas trwania wszystkich zmian parametrów PL wyniósł 0,1 s, co odpowiada szybkości rozwoju reżimów awaryjnych. Powodowało to fluktuacje ciśnienia i przepływu płynu. Jednocześnie udawało się utrzymywać ciśnienie PS na zadanym poziomie. Należy zaznaczyć, że w normalnych warunkach działania zmiana parametrów PL odbywa się płynnie i powoli, co nie powoduje występowania tak intensywnych fluktuacji.

Adekwatność modelowania potwierdza analiza reżimów przejściowych sprzętu, a także koincydencja wskaźników reżimów ustalonych, które są ustalane po

zakończeniu reżimów przejściowych, i odpowiadających im parametrów katalogowych sprzętu.

Wnioski

Opracowano i zweryfikowano model matematyczny agregatów asynchronicznych potężnej przepompowni z automatyczną stabilizacją ciśnienia. Połączenie separowanych modeli w jedną całość przy porównywalnym uszczegółowieniu podsystemów elektromechanicznych i hydraulicznych pozwala na równoczesne badanie procesów zachodzących w tych podsystemach. Równania podsystemu hydraulicznego zbudowano na zasadzie analogii elektrohydrodynamicznej i odzwierciedlają one procesy fizyczne zachodzące w jego elementach wewnętrznych. Umożliwiło to wykorzystanie teorii obwodów elektrycznych do napisania równań nie tylko dla podsystemów elektromechanicznych, ale i hydraulicznych. Obliczenia oporów rozpraszających modelu CP przeprowadza się na podstawie wymiarów geometrycznych elementów wewnętrznych pompy, uwzględniając zależną od temperatury lepkość kinematyczną cieczy roboczej. Dlatego podczas symulacji możliwe jest uwzględnienie wpływu tych czynników zarówno na reżimy transportu cieczy w systemach hydraulicznych, jak i na reżimy działania ich kompleksów elektrycznych. Zwiększenie wydajności istniejących potężnych przepompowni jest możliwe poprzez optymalizację ich reżimów. Opracowany model pozwala na

badanie reżimów działania potężnych przepompowni bez konieczności przeprowadzania eksperymentów fizycznych na drogim sprzęcie operacyjnym. Pozwoli to uniknąć zakłóceń w jego funkcjonowaniu i przerw w transporcie cieczy, co wyeliminuje ryzyko wypadków i strat finansowych. Model ten można zintegrować z systemami automatyzacji służącymi do projektowania potężnych przepompowni i stosować przy poszukiwaniu optymalnych rozwiązań projektowych. Obiecującym kierunkiem udoskonalenia opracowanego modelu matematycznego może być jego przekształcenie w model hybrydowy poprzez uzupełnienie go o fizyczny system automatycznego sterowania, co znacząco zwiększy jego efektywność.

References

- [1] I. Pulido-Calvo, and J.C. Gutierrez-Estrada, "Selection and Operation of Pumping Stations of Water Distribution Systems," *Environmental Research Journal*, vol. 5, pp. 1-20, 2011.
- [2] P.O. Kurlyak, "Doslidzhennia enerhetychnykh parametriv mahistralnykh nasosnykh ahrehativ naftoperekachuvalnykh stantsii" ["Research on energy parameters of main pumping units of oil pumping stations"], *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch – Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, № 1, pp. 81-87, 2015. (Ukr.)
- [3] V. Lysiak, M. Oliinyk, O. Sivakova, and M. Sabat, "Dynamic modelling of centrifugal hydraulic load of pumping station electric drive," *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 5, № 1, pp. 1-8, 2019. doi: 10.23939/jeecs2019.01.001.
- [4] Y. Paranchuk, and V. Lysiak, "Energy efficient power supply system and automatic control of modes of the «power supply – pumping station» complex," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, iss. 3, pp. 115-124, 2015. doi: 10.29202/nvngu/2018-3/16.
- [5] A.S. Kutsyk, A.O. Lozynskyi, and O.F. Kinchur, "Matematychna model systemy «chastotno-kerovanyi elektropyvod – nasos – vodoprovodna mrezhha»" ["Mathematical model of the system «frequency-controlled electric drive - pump - water supply network»"], *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Seriya: Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy – Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic». Series: Electrical Power and Electromechanical Systems*, № 834, pp. 48-55, 2015. (Ukr.)
- [6] A.U. Gomrokchi, and A. Parvaresh Rizi, "Flexibility of energy and water management in pressurized irrigation systems using dynamic modeling of pump operation", *Environment, Development and Sustainability*, vol. 23, pp. 18232-18251, 2021. doi: 10.1007/s10668-021-01436-7.
- [7] G. Janevska, "Mathematical Modeling of Pump System," in *Electronic International Interdisciplinary Conference*, Žilina, Slovak Republic, Sept. 2-6, 2013, vol. 2, pp. 455-458.
- [8] Y. Wang, H. Zhang, Z. Han, and X. Ni, "Optimization Design of Centrifugal Pump Flow Control System Based on Adaptive Control," *Processes*, vol. 9(9), article 1538, 2021. doi: 10.3390/pr9091538.
- [9] F. Salmasi, J. Abraham, and A. Salmasi, "Design Considerations for Pumping Stations Using Variable Speed Pumps," *Novel Perspectives of Engineering Research*, vol. 10, pp. 98-118, 2022. doi: 10.9734/bpi/nper/v10/2220B.
- [10] V.H. Lysiak, "Mathematical modeling of multi-units pumping station with asynchronous electric drive of centrifugal pumps," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 21(3), pp. 226–234, 2023. doi: 10.15598/aece.v21i3.4718.
- [11] V.S. Kostyshyn, I.I. Yaremak, and P.O. Kurlyak, "Creation of object-oriented model of centrifugal pump on the basis of electrohydrodynamic analogy method," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 6, pp. 72-79, 2019. doi: 10.29202/nvngu/2019-6/11.
- [12] G. Mousmoulis, N. Karlsen-Davies, G. Aggidis, I. Anagnostopoulos, and D. Papantonis, "Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization", *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 75, pp. 300-311, 2019. doi: 10.1016/j.euromechflu.2018.10.015.
- [13] C.E. Sunal, V. Velisavljevic, V. Dyo, B. Newton, and J. Newton, "Centrifugal Pump Fault Detection with Convolutional Neural Network Transfer Learning", *Sensors*, no. 8, article 2442, 2024. doi: 10.3390/s24082442.
- [14] V.S. Kostyshyn, and P.O. Kurlyak, "Simulation of performance characteristics of centrifugal pumps by the electro-hydrodynamic analogy method," *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, vol. 2, № 1, pp. 24-31, 2015.
- [15] O.I. Okoro, *Modelling and computer simulation of induction machine: Dynamic and thermal modelling of induction machine with non-linear effects*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.

MATHEMATICAL MODELING OF AUTOMATIC PRESSURE STABILIZATION OF MAIN PUMPING STATIONS WITH ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF CENTRIFUGAL PUMPS

Lysiak V.H. PhD (Engineering), associate professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8371-6455>, e-mail: vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua;

Dyda R.B. postgraduate student, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0765-3745>, e-mail: roman.b.dyda@lpnu.ua

The paper is devoted to the development of a mathematical model of a high-capacity controlled pumping station with automatic pressure stabilization. The purpose of the work is to increase the efficiency of the liquid transportation process through main and large distribution pipelines. The proposed model with a comparable level of detail describes the electromechanical and hydraulic subsystems as a single entity. The parameters of the centrifugal pump model are calculated based on the geometry and dimensions of its elements, taking into account the influence of the physical properties of the working fluid. This makes it possible to conduct a comprehensive study of such objects without physical impact on them, taking into account the mutual dependence of both subsystems and changes in the parameters of the elements of the hydraulic subsystem. The paper suggests directions for use and ways to expand the functionality of the developed model.

Keywords: motor, centrifugal pump, control system, mathematical model, pipeline, pumping station.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТИСКУ МАГІСТРАЛЬНИХ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ

Лисяк В.Г. канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8371-6455>, e-mail: vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua;

Дйда Р.Б. аспірант, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0765-3745>, e-mail: roman.b.dyda@lpnu.ua

Стаття присвячена розробці математичної моделі керованої насосної станції великої потужності з автоматичною стабілізацією напору. Розроблена модель дозволяє досліджувати режими роботи потужних насосних станцій без необхідності проведення фізичних експериментів на дорогому діючому обладнанні. Це дозволить уникнути збоїв у його роботі та перебоїв у транспортуванні рідин, що виключить ризик аварій та фінансових втрат. Потужні насосні станції магістральних та великих розподільчих трубопроводів мають стратегічне значення. Вони забезпечують переміщення великих обсягів рідини та складаються з нерозривно пов'язаних між собою електромеханічної та гідравлічної підсистем. Перевитрати електроенергії внаслідок неоптимальності режимів окремих потужних агрегатів, неоптимальної кількості одночасно працюючих менш потужних агрегатів, а також під час перебігу перехідних процесів є досить значними. Метою роботи є підвищення ефективності процесу транспортування рідини магістральними та великими розподільчими трубопроводами. Запропонована модель зі співставним рівнем деталізації описує електромеханічну та гідравлічну підсистеми як єдине ціле. Параметри моделі відцентрового насоса обчислюються за геометрією та розмірами його елементів з урахуванням впливу фізичних властивостей робочої рідини. Це дає можливість комплексного дослідження таких об'єктів без фізичного впливу на них з урахуванням взаємної залежності обох підсистем та змін параметрів елементів гідравлічної підсистеми. Модель може бути інтегрована з системами автоматизації проектування потужних насосних станцій і використовуватися при пошуку оптимальних проектних рішень. Перспективним напрямком удосконалення математичної моделі може бути її трансформація в гібридну модель шляхом доповнення фізичною системою автоматичного керування.

Ключові слова: асинхронний двигун, відцентрова помпа, математична модель, система керування, трубопровід, помпова станція.

Перелік використаних джерел

[1] Pulido-Calvo I., Gutierrez-Estrada J. C. Selection and Operation of Pumping Stations of Water Distribution Systems. *Environmental Research Journal*. 2011. Vol. 5. Pp. 1-20.

[2] Курляк П. О. Дослідження енергетичних параметрів магістральних насосних агрегатів нафтоперекачувальних станцій. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. № 1. С. 81-87.

- [3] Dynamic modelling of centrifugal hydraulic load of pumping station electric drive / Lysiak V., Oliynyk M., Sivakova O., Sabat M. *Energy Engineering and Control Systems*. 2019. Vol. 5. № 1. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2019.01.001>.
- [4] Paranchuk Y., Lysiak V. Energy efficient power supply system and automatic control of modes of the «power supply – pumping station» complex. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015. Iss. 3. Pp. 115-124. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/16>.
- [5] Куцик А. С., Лозинський А. О., Кінчур О. Ф. Математична модель системи «частотно-керований електропривод – насос – водопровідна мережа». *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи: збірник наукових праць. 2015. № 834. С. 48-55.
- [6] Gomrokchi A. U., Parvaresh Rizi A. Flexibility of energy and water management in pressurized irrigation systems using dynamic modeling of pump operation. *Environment, Development and Sustainability*. 2021. Vol. 23. Pp. 18232-18251. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01436-7>.
- [7] Janevska G. Mathematical Modeling of Pump System. *Electronic International Interdisciplinary Conference, Žilina, Slovak Republic, 2-6 September 2013*. Vol. 2. Pp. 455-458.
- [8] Wang Y., Zhang H., Han Z., Ni X. Optimization Design of Centrifugal Pump Flow Control System Based on Adaptive Control. *Processes*. 2021. Vol. 9(9). Article 1538. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9091538>.
- [9] Salmasi F., Abraham J., Salmasi A. Design considerations for pumping stations using variable speed pumps. *Novel Perspectives of Engineering Research*. 2022. Vol. 10. Pp. 98-118. DOI: <https://doi.org/10.9734/bpi/nper/v10/2220B>.
- [10] Lysiak V. H. Mathematical modeling of multi-units pumping station with asynchronous electric drive of centrifugal pumps. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2023. Vol. 21(3). Pp. 226-234. DOI: <https://doi.org/10.15598/aeec.v21i3.4718>.
- [11] Kostyshyn V. S., Yaremak I. I., Kurlyak P. O. Creation of object-oriented model of centrifugal pump on the basis of electrohydrodynamic analogy method. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 6. Pp. 72-79. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/11>.
- [12] Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization / G. Mousmoulis et al. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. 2019. Vol. 75. Pp. 300-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.10.015>.
- [13] Centrifugal Pump Fault Detection with Convolutional Neural Network Transfer Learning. *Sensors* / C.E. Sunal et al. 2024. Vol. 24, no. 8. Article 2442. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24082442>.
- [14] Kostyshyn V. S., Kurlyak P. O. Simulation of performance characteristics of centrifugal pumps by the electro-hydrodynamic analogy method. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2015. Vol. 2, № 1. Pp. 24-31.
- [15] Okoro O. I. Modelling and computer simulation of induction machine: Dynamic and thermal modelling of induction machine with non-linear effects. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 216 p.

Стаття надійшла 18.03.2025

Стаття прийнята 25.06.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Lysiak V. H., Dyda R. B. Matematyczne modelowanie automatycznej stabilizacji ciśnienia głównych przepompowni z asynchronicznym napędem elektrycznym pomp odśrodkowych. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 51. С. 102-109. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344729>.

**ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В МЕРЕЖІ 0,4 кВ****Сасенко Ю.Л.***д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-4700>, e-mail: sayenko_y_l@pstu.edu;***Любарцева Ю.І.***аспірантка, ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0624-1983>, e-mail: lubartseva_y_i@pstu.edu*

Сучасний розвиток енергетики характеризується активною інтеграцією фотоелектричних станцій (ФЕС), особливо малих і середніх, у розподільчі мережі низької напруги 0,4 кВ. Цей процес відповідає світовим тенденціям і сприяє підвищенню енергетичної стійкості України, зменшенню втрат електроенергії та підвищенню енергоефективності. Однак зростання частки ФЕС створює низку критичних викликів для забезпечення належного рівня показників якості електроенергії (ПЯЕ) в мережах 0,4 кВ. Аналіз літературних джерел та практичних досліджень показав, що основними проблемами, які виникають при підключенні ФЕС, є підвищення напруги та її флуктуації при змінній інсоляції, а також гармонічні спотворення. Зокрема, дослідження демонструють, що при проникненні ФЕС до 50% загальний коефіцієнт гармонік (THD) може перевищувати нормативні межі. Додатково виникають проблеми несиметрії напруги через нерівномірне підключення однофазних інверторів і реверсивні потоки потужності. Ці явища негативно впливають на надійність роботи мережі та експлуатацію електрообладнання. Для нівелювання цих технічних проблем та забезпечення надійної роботи системи рекомендовано впровадження комплексних рішень, що включають інвертори з функціями керування напругою та реактивною потужністю (смайт-інвертори), які можуть підтримувати напругу в допустимих межах. Ключовим заходом для боротьби з гармоніками є використання активних фільтрів, таких як розподільчі статичні конденсатори (DSTATCOM), інтегровані з накопичувачами енергії (BESS). Ефективними також є організаційні заходи, такі як балансування навантажень по фазах та оптимізація точок підключення джерел генерації. Впровадження цих технологій разом із модернізацією мережевого обладнання та розбудовою інтелектуальних систем управління (Smart Grid) є необхідною умовою для підвищення операційної надійності енергосистеми в умовах зростаючої децентралізації.

Ключові слова: якість електричної енергії, фотоелектричні станції, розподілена генерація, мережі 0,4 кВ, гармонічні спотворення, підвищення напруги, смайт-інвертори, активні фільтри, Smart Grid.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним впровадженням відновлюваних джерел енергії, серед яких важливе місце займають ФЕС. В умовах зростання попиту на екологічно чисту електроенергію їхня частка у структурі виробництва постійно збільшується. Особливо динамічно розвивається сегмент малих та середніх ФЕС, які підключаються безпосередньо до мережі низької напруги 0,4 кВ (рис. 1) [1-2].

Суттєве підвищення цін на енергоносії та перебої з електропостачанням спричинили зростання інтересу побутових споживачів до використання домашніх сонячних електростанцій для автономного або додаткового забезпечення електроенергією приватних будинків, фермерських господарств і невеликих виробничих об'єктів.

Розподілена сонячна генерація має низку переваг порівняно з централізованими сонячними електростанціями (СЕС). Такі установки можна розміщувати в різних умовах – на дахах житлових і комерційних будівель, автостоянках або сільськогосподарських угіддях. Розташування станцій безпосередньо поруч із місцями споживання електроенергії дозволяє зменшити

потребу в лініях електропередачі та скоротити втрати енергії в мережі.

Разом із позитивними аспектами – зменшенням споживання традиційних енергоресурсів, зниженням викидів парникових газів та підвищенням енергетичної незалежності – інтеграція фотоелектричних станцій у низьковольтні мережі створює низку технічних проблем. Однією з найбільш актуальних є проблема забезпечення належного рівня якості електричної енергії (ЯЕЕ), адже саме у розподільчих мережах 0,4 кВ відхилення параметрів енергії безпосередньо впливають на побутових та промислових споживачів.

Дослідження показують, що підключення ФЕС може призводити до флуктуацій та підвищення напруги, появи гармонічних складових, несиметрії фазних напруг і навіть реверсивних потоків енергії. Ці явища знижують надійність роботи мережі, погіршують умови експлуатації електрообладнання і створюють додаткові виклики для системи релейного захисту та автоматики.

Отже, актуальним завданням є аналіз впливу фотоелектричних станцій на якість електричної енергії у мережах 0,4 кВ та пошук шляхів мінімізації негативних наслідків.

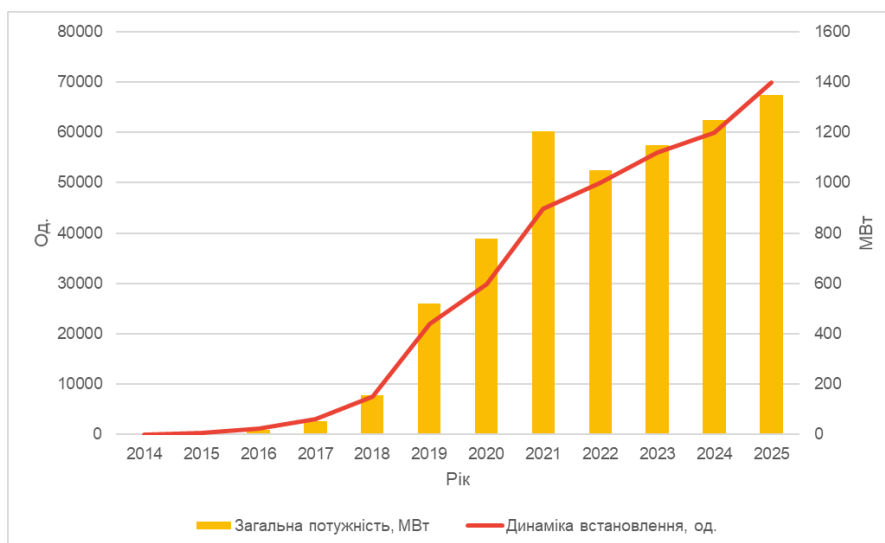


Рис. 1 – Динаміка розвитку домашніх СЕС у приватних домогосподарствах України

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Поточний рівень інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичну систему України залишається недостатнім для забезпечення належної енергетичної стійкості та розглядається як ключовий напрям подальшого технологічного розвитку. Водночас наявний високий невикористаний потенціал ВДЕ, який, за оцінками, становить близько 60 ГВт для сонячної та 30 ГВт для вітрової енергетики, суттєво перевищує поточні обсяги їх впровадження [3]. Така диспропорція свідчить про значні можливості для розширення відновлюваної генерації в Україні. Разом із тим спостерігається регіональна нерівномірність розвитку, адже найбільша концентрація потужностей зосереджена у південних і степових регіонах, що створює додаткові виклики для управління транзитними потоками електроенергії, балансування навантажень і підтримання стабільності мережі у віддалених зонах. Потенціал відновлювальної енергії в Україні наведено в табл. 1.

Збільшення частки встановленої потужності ВДЕ в електричних мережах призводить до ускладнення керування та прогнозування режимів роботи таких мереж для операторів системи передачі (ОСП) та операторів систем розподілу (ОСР). Так, збільшення встановленої потужності ВДЕ в електромережах призводить до зростання похибки прогнозування, що вимагає застосування більш складних та сучасних моделей для побудови прогнозу з урахуванням більшої кількості вхідних параметрів [4], [5].

Інтеграція перебуває на етапі, що вимагає комплексних системних змін, а не лише нарощування потужностей. Фактичний ступінь інтеграції обмежений недостатнім розвитком балансувальних потужностей та

інтелектуальних систем управління (Smart Grid). Окрім проблеми недостатнього розвитку ВДЕ в Україні, що свідчить про актуальність даної теми, також активно досліджуються питання впливу інтеграції ФЕС у розподільні електричні мережі на якість електроенергії та роботу системи.

Відповідно до [3] різні типи ВДЕ по-різному впливають на технічну стабільність енергосистеми. Найбільші коливання напруги та частоти спостерігаються у разі використання сонячних (12-15% та 8-10%) і вітрових (10-14% та 7-9%) електростанцій, що зумовлено їхньою залежністю від погодних умов (табл. 2).

У статті [6] досліджено алгоритми визначення оптимального розміщення та потужності СЕС, а також аналіз змін гармонічних спотворень напруги й струму при різних рівнях проникнення СЕС у мережу. Дослідження показали, що рівень проникнення 48% від загального навантаження призводить до зростання гармонік та погіршення якості електроенергії.

У роботі [7] досліджені розподільні мережі з включенням фотоелектричних установок, розглянуті варіанти з різним рівнем встановленої потужності (від 10% до 50% від загального навантаження) та різними погодними умовами, що впливають на генерацію. В роботах аналізувалися наступні показники: рівень напруги, частота, гармонічний склад струму та напруги при раптових змінах навантаження чи генерації.

Підсумовуючи наведені дослідження, можна навести основні показники якості електричної енергії, що змінюються при збільшенні частки ФЕС (табл. 3) У роботі [8] було розглянуто зміну коефіцієнту гармонік в мережах різного класу напруги. Як бачимо, даний показник зменшується зі збільшенням класу напруги і саме в мережах 0,4 кВ є найбільш високим.

Таблиця 1

Потенціал відновлювальної енергії в Україні

Тип ВДЕ	Потенційна потужність (ГВт)	Основні регіони розташування
Сонячна енергетика	60	Південні регіони: Херсон, Миколаїв, Одеська області
Вітрова енергетика	30	Приморські та степові регіони: Запорізька, Донецька, Львівська області
Біоенергетика	25	Центральні та західні регіони: Київська, Вінницька, Черкаська області
Гідроенергетика	8	Карпати, Придніпров'я, Дністер
Геотермальна енергетика	5	Закарпаття, Карпати
Загальний потенціал	128	

Таблиця 2

Середнє значення коливання частоти і напруги у % від номінального в мережі з ВДЕ

Тип ВДЕ	Коливання напруги (%)	Коливання частоти (%)
Сонячна енергетика	12-15	8-10
Вітрова енергетика	10-14	7-9
Біоенергетика	4-6	2-4
Гібридні системи	6-8	4-6

Таблиця 3

Вплив ФЕС на показники ПКЕ

Показник	Норма (ДСТУ)	Без ФЕС	ФЕС 30%	ФЕС 50%
Напруга (відхилення)	± 5	0,8%	3,2%	6,1%
Частота (відхилення)	$\pm 0,2$ Гц	0,05 Гц	0,11 Гц	0,18 Гц
Загальний коефіцієнт гармонік (THD)	$\leq 3\%$	1,2%	2,8%	4,5%

Мета статті

Метою статті є всебічна оцінка впливу інтеграції фотоелектричних станцій на показники якості електричної енергії у розподільчих мережах напругою 0,4 кВ та обґрунтування технічних рішень, спрямованих на мінімізацію негативних наслідків цього впливу.

Виклад основного матеріалу

З метою оцінки впливу інтеграції СЕС на показники якості електроенергії було проведено серію вимірювань на одній із розподільчих підстанцій Київської області. Вимірювання здійснювалися у два етапи – до та після поетапного підключення сонячної електростанції до мережі. Під час експерименту реєструвалися навантаження приєднань та основні показники якості електроенергії, зокрема коливання напруги (%), загальний коефіцієнт гармонік (THD, %), відхилення частоти (Гц). Для кожної величини наведені середні значення, 95% довірчі інтервали (табл. 4). Результати показують погіршення в усіх показниках після інтеграції СЕС.

Період спостережень склав по 168 точок (1 тиждень при 1-годинній вибірці) – «до» та «після» інтеграції. Для визначення показників ЯЕЕ був використаний

прилад аналізатор якості електроенергії типу Fluke 435-II. Інтервали осереднення – 10 хвилин. Рівень інтеграції склав 20% від встановленої потужності мережі.

Результати даних вимірювань дозволяють описати характер змін показників якості електроенергії (ПКЕ).

Середнє відхилення напруги зросло з 2,10% до 3,40% (приблизно + 62% відносного зростання). Це свідчить про посилення коливань локальної напруги після інтеграції фотоелектричної генерації – ймовірно через фазову несиметрію, нерегулярну генерацію при змінній інсоляції та недостатню реактивну потужність місцевої мережі.

Загальний коефіцієнт гармонік THD: зріст з 3,2% до 4,8% (приблизно +50% відносного зростання). Додавання перетворювачів постійного струму в змінний струм (інверторні системи) можуть вносити вищі гармоніки, відсутність відповідної фільтрації місцевої підстанції THD.

Середнє абсолютне відхилення частоти зросло з 0,08 Гц до 0,12 Гц (приблизно +50% відносного зростання), що вказує на тимчасове збільшення локальних дисбалансів між генерацією та навантаженням.

Отримані результати підтверджують висновки попередніх дослідників щодо впливу ВДЕ на ПЯЕ.

Таблиця 4

Результати вимірювань

Показник	До інтеграції (n =168). Середні 95% довірчі інтервали	Після інтеграції (n =168). Середні 95% довірчі інтервали
Напруга (відхилення), %	2,10 (1,98 – 2,22)	3,40 (3,22 - 3,58)
Частота (відхилення), Гц	0,080 (0,075 - 0,085)	0,120 (0,112 - 0,128)
Загальний коефіцієнт гармонік (THD),%	3,20 (3,05 – 3,35)	4,80 (4,56 – 5,04)

Проаналізувавши дослідження, можна виділити декілька основних напрямів для мінімізації проблем, пов'язаних зі збільшенням ФЕС у розподільчих мережах 0,4 кВ:

1. Використання інверторів з функціями керування напругою та реактивною потужністю.
2. Встановлення активних фільтрів для зниження гармонік.
3. Балансування навантажень по фазах та вибір місця підключення СЕС до розподільчої мережі.
4. Модернізація мережевого обладнання (трансформатори з РПН, сучасні релейні захисти).
5. Використання систем моніторингу якості електричної енергії, побудова Smart grid.

Розглянемо кожен із них більш детально

Використання інверторів з функціями керування напругою та реактивною потужністю.

Використання інверторів із функціями керування напругою та реактивною потужністю є одним із ключових напрямів підвищення стійкості та ефективності роботи електричних мереж із розподіленою генерацією. Такі інвертори, що часто називаються «смарт-інверторами», здатні не лише перетворювати постійний струм у змінний, а й виконувати динамічне регулювання напруги в точці приєднання шляхом зміни реактивного обміну з мережею [9-10]. Застосування алгоритмів типу Volt-VAR, Volt-Watt та Q(P) забезпечує підтримання напруги в допустимих межах, зменшення втрат потужності й покращення якості електроенергії. Крім того, такі пристрої можуть працювати у режимах постійного коефіцієнта потужності або автоматичної компенсації реактивних навантажень, виконуючи функції, подібні до STATCOM. Це дозволяє реалізувати децентралізоване регулювання режимів розподільчих мереж, особливо актуальне для систем із великою часткою фотоелектричних станцій, де виникають коливання напруги через нестатистичність генерування.

Інвертори з функціями керування напругою та реактивною потужністю відіграють ключову роль у сучасних електроенергетичних системах, особливо у мережах із розподіленою генерацією на базі відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні фотоелектричні станції та вітрові установки.

Інвертор – це перетворювач постійного струму у змінний, який синхронізується з мережею. Сучасні «смарт-інвертори» не лише передають активну потужність у мережу, а й здійснюють динамічне

регулювання напруги та компенсацію реактивної потужності, забезпечуючи підтримку стабільності та якості електроенергії.

Такі інвертори працюють у четвертому квадранті діаграми потужності – тобто можуть як споживати, так і генерувати реактивну потужність залежно від умов мережі.

Функції керування напругою:

- Підтримка локальної напруги (Voltage Support). Інвертор автоматично регулює рівень напруги у точці приєднання, змінюючи співвідношення між активною (P) та реактивною (Q) потужностями.

- Функція Q(V) або Volt-VAR. Це залежність реактивної потужності від напруги. Якщо напруга зростає вище номінальної, інвертор споживає реактивну потужність (індуктивний режим), а коли падає – генерує (ємнісний режим).

- Функція P(V) або Volt-Watt. За надлишку напруги інвертор може знижувати відпуск активної потужності для запобігання перевищенню допустимих меж.

Функції керування реактивною потужністю:

- Компенсація реактивних навантажень. Інвертори можуть працювати як динамічні компенсатори (аналог STATCOM), підтримуючи заданий $\cos\phi$ або реактивний обмін з мережею.

- Режим постійного $\cos\phi$ (Power Factor Control). Інвертор утримує фіксований коефіцієнт потужності незалежно від рівня напруги.

- Режим Q(P). Реактивна потужність регулюється пропорційно активній – корисно при зміні інтенсивності сонячного випромінювання або вітру.

Переваги використання:

Підвищення стабільності напруги у слабких мережах;

Зменшення втрат потужності у лініях розподілу;

Поліпшення якості електроенергії (зниження коливань напруги, підтримка симетрії фаз);

Можливість децентралізованого регулювання без необхідності централізованих пристроїв компенсації;

Зниження ризику відключення СЕС та ВЕС при коливаннях напруги завдяки стійкішому режиму роботи.

Встановлення активних фільтрів для зниження гармонік.

Одним із перспективних методів підвищення якості електроенергії у розподільчих мережах з

інтегрованими сонячними електростанціями є використання розподільчого статичного компенсатора (DSTATCOM), оснащеного системою накопичення енергії (BESS). Такий підхід дозволяє ефективно компенсувати реактивну потужність, зменшувати гармонічні спотворення та стабілізувати напругу в умовах змінної генерації від СЕС. Особливо це актуально під час синхронізації або відключення СЕС від мережі, а також при різких змінах інсоляції, що викликають коливання активної та реактивної потужності.

У дослідженні [11] було реалізовано модифіковану модель IEEE-13-вузлової тестової системи з інтегрованою СЕС потужністю 500 кВт та DSTATCOM, керованим за допомогою теорії синхронної координатної системи (SRF). Контролер SRF дозволяє трансформувати струми у dq-координати, виділяти активні та реактивні компоненти, а також генерувати сигнали широтно-імпульсної модуляції (PWM) для керування інвертором DSTATCOM. Такий підхід забезпечує швидке реагування на зміни в мережі та дозволяє підтримувати рівень гармонік нижче 5%, що відповідає стандарту IEEE-519.

Результати моделювання, підтверджені в реальному часі за допомогою цифрового симулятора RTDS, показали, що запропонований метод дозволяє зменшити гармонічні спотворення до 90% та покращити стабільність напруги під час аварійних режимів роботи СЕС. Зокрема, під час відключення СЕС спостерігалось зменшення пікових коливань напруги на 41% завдяки втручанням DSTATCOM. Таким чином, інтеграція DSTATCOM з BESS є ефективним рішенням для забезпечення високої якості електроенергії в умовах зростаючого проникнення відновлюваних джерел енергії в розподільчі мережі.

Балансування навантажень по фазах та вибір місця підключення СЕС до розподільчої мережі.

Балансування однофазних інверторів за фазами є одним із ключових аспектів забезпечення стабільності та якості електроенергії у розподілених енергетичних системах. У мережах із великою часткою розподіленої генерації (РГ), зокрема фотоелектричних станцій, часто застосовуються однофазні інвертори, підключені до різних фаз трифазної мережі. Нерівномірний розподіл потужності між фазами призводить до фазного дисбалансу, що проявляється у зростанні струмів нульового провідника, появи гармонічних спотворень та підвищенні втрат у мережевому обладнанні. Це, у свою чергу, знижує ефективність енергопостачання та може негативно впливати на роботу як побутових, так і промислових споживачів.

Застосування алгоритмів побудови мереж, спрямованих на балансування однофазних інверторів між фазами, дозволяє зменшити ці негативні ефекти. Оптимальний розподіл активної та реактивної потужності між інверторами сприяє зниженню асиметрії напруг і струмів, покращенню показників якості електроенергії та підвищенню надійності роботи системи в цілому. Важливу роль при цьому відіграє правильний вибір

точки підключення інвертора до мережі. Невдало обрана точка може призвести до локального перевантаження елементів мережі, появи коливань напруги та збільшення втрат енергії. Раціональне визначення місця підключення з урахуванням конфігурації мережі, потужності джерел та характеру навантаження забезпечує ефективний розподіл генерованої енергії, мінімізує вплив РГ на мережеві режими та підвищує рівень електромагнітної сумісності.

У роботі [12] виконано моделювання та оптимізацію режимів роботи електроенергетичних систем із розосередженою генерацією з урахуванням впливу відновлюваних джерел енергії на параметри мережі. Автори застосували імітаційне моделювання для оцінювання впливу потужності та місця розташування джерел РГ на втрати електроенергії, профілі напруги та стабільність режимів. Запропонований підхід базується на поєднанні математичної оптимізації та комп'ютерного моделювання, що дало змогу визначити ефективні стратегії інтеграції ВДЕ у розподільні електричні мережі.

Результати дослідження показали, що оптимальне розміщення джерел РГ дозволяє зменшити втрати електроенергії на 10-20% та покращити показники якості напруги, особливо в периферійних вузлах мережі. Робота підтверджує ефективність використання моделей оптимального розподілу генерації для забезпечення енергоефективності та підвищення надійності електричних мереж з великою часткою ВДЕ.

Модернізація мережевого обладнання (трансформатори з РПН, сучасні релейні захисти).

Трансформатори з РПН дозволяють регулювати напругу в мережі в режимі реального часу, що особливо важливо для забезпечення сталості напруги у розподільчих мережах із змінними навантаженнями та генерацією від ФЕС. Це дає змогу підтримувати напругу в межах нормативів, запобігаючи її перевищенню чи зниженню, що може виникати через нерівномірний розподіл генерації та споживання. Ефективне застосування РПН сприяє зниженню втрат електроенергії, а також покращенню стабільності і якості електропостачання споживачам [13-14].

Сучасні релейні захисти на основі мікроелектроніки забезпечують більш високий рівень надійності й швидкості відключення при аварійних ситуаціях у мережі [15]. Це знижує ризик поширення аварій, що важливо для захисту мереж із ФЕС, де можуть виникати нестабільності через варіації генерації. Використання комбінованих систем релейного захисту дозволяє зберігати селективність та стійкість мережі при застосуванні децентралізованих джерел генерації, зокрема сонячних [16].

Інтеграція ФЕС призводить до зміни перетоку потужності, що може викликати нестабільність напруги і збільшення гармонік у мережі. Модернізація із застосуванням РПН і сучасних захистів допомагає адаптуватися до цих змін, забезпечуючи оптимальний режим роботи мережі і покращуючи якість електроенергії.

Крім того, сучасні системи управління реактивною потужністю ФЕС разом з РПН трансформаторами дозволяють регулювати напругу більш ефективно, зменшуючи необхідність включення додаткових компенсаторів.

У роботі [17] досліджено задачу визначення оптимальної точки приєднання сонячної електростанції до розподільної електричної мережі промислового підприємства з метою мінімізації втрат електроенергії та відхилень напруги. Для аналізу використано комп'ютерне імітаційне моделювання в середовищі Matlab/Simulink, що дало змогу порівняти режими роботи мережі за різних варіантів підключення СЕС. Результати показали, що підключення до шин низької напруги забезпечує нормативні рівні напруги, але збільшує втрати активної потужності приблизно на 42%, тоді як приєднання безпосередньо до точки навантаження зменшує втрати, проте викликає понаднормові відхилення напруги. Автори зробили висновок про доцільність підключення СЕС у точці навантаження за умов застосування заходів для нормалізації напруги, що підкреслює важливість комплексного підходу до оптимізації інтеграції відновлюваних джерел енергії в розподільні мережі.

Використання систем моніторингу якості електричної енергії, побудова Smart grid.

Робота [3] є джерелом, що розкриває технологічні та управлінські аспекти інтеграції розподілених джерел енергії (РДЕ) в національну енергосистему. Дослідження фокусується на ідентифікації критичних чинників, що визначають успішність децентралізації генерації в контексті енергетичної стійкості України.

Автори підтверджують, що впровадження розподіленої генерації є безальтернативним напрямком для підвищення стійкості, ефективності та екологічної безпеки енергосистеми. Це є методологічною основою для подальших досліджень у сфері енергетичного переходу.

Пріоритетність технологічних рішень: дослідження емпірично обґрунтовує ключову роль систем накопичення енергії (СНЕ), зокрема гібридних СНЕ, для балансування нерівномірної генерації від сонячних та вітрових електростанцій. Найбільша гнучкість, автономність та висока надійність досягається шляхом створення гібридних мікромереж – конфігурації, визнаної найбільш перспективною для України.

Кількісне обґрунтування ефективності управління: у роботі представлені вагомні кількісні показники, що підтверджують економічну та технічну доцільність запропонованих рішень:

Встановлення інверторних систем, СНЕ та гібридних мікромереж потенційно дозволяє знизити середні витрати енергії на 12-18%.

Застосування інтелектуальних систем управління сприяє скороченню пікових навантажень на електромережу на 15-20%.

Вимоги до систем управління: автори акцентують на необхідності комплексної модернізації інфраструктури через впровадження інтелектуальних систем:

- Smart Grid для забезпечення адаптивного управління.
- DERMS (Distributed Energy Resource Management System) для координації децентралізованих джерел та оптимізації процесів генерації-споживання.

Таким чином, робота [3] є базовим джерелом для аналізу технічних переваг та управлінських викликів децентралізації. Її висновки підкреслюють необхідність зміщення фокусу з простого нарощування потужностей ВДЕ на інтеграційні технології (СНЕ, мікромережі) та цифровізацію управління (Smart Grid, DERMS) для забезпечення операційної надійності національної енергосистеми.

Висновки

У ході дослідження встановлено, що активна інтеграція фотоелектричних станцій у розподільчі мережі 0,4 кВ, попри значні екологічні та енергетичні переваги, супроводжується низкою технічних проблем.

Основними з них є підвищення та флуктуації напруги, гармонічні спотворення, несиметрія фаз і реверсивні потоки потужності, що негативно впливають на показники якості електроенергії та надійності електропостачання. Аналіз існуючих підходів показав, що ефективне вирішення цих проблем можливе за рахунок комплексного впровадження смарт-інверторів із функціями регулювання напруги та реактивної потужності, застосування активних фільтрів (DSTATCOM), балансування однофазних інверторів між фазами, модернізації мережевого обладнання з використанням трансформаторів із РПН та впровадження інтелектуальних систем керування типу Smart Grid.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка математичних моделей для моделювання процесів інтеграції великої кількості ФЕС у розподільчі мережі, оптимізація місць їх підключення та алгоритмів керування реактивною потужністю. Важливим є також дослідження взаємодії систем накопичення енергії з інверторними технологіями та побудова цифрових платформ управління на основі DERMS.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання енергопостачальними компаніями для підвищення стабільності та якості електропостачання, а також розробниками обладнання – для створення інтелектуальних інверторних систем, фільтрів та пристроїв компенсації, що забезпечать безпечну та ефективну інтеграцію розподілених джерел генерації у мережі низької напруги.

Перелік використаних джерел

- [1] Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Інформаційні матеріали. URL: <https://old.sae.gov.ua/uk/content/informatsiyni-materialy> (дата звернення: 15.05.2025).

- [2] Ігнат'єв С. За перше півріччя 2025 року енергосистема додала 1 ГВт розподіленої генерації. Український інститут майбутнього (UIF). 2025. URL: <https://uifuture.org/publications/energosystema-1-gvt/> (дата звернення: 15.05.2025).
- [3] Prospects for the integration of distributed energy sources into the Ukrainian power grid / I. Hrytsiuk et al. *Machinery & Energetics*. 2025. Vol. 16. Pp. 130-145. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.130>.
- [4] The impact of meteorological data on the accuracy of solar electricity generation forecasting using neural networks / Sayenko Y., Pawelek R., Baranenko T., Liubartsev V. *Energies*. 2025. Vol 18(9). Article 2309. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092309>.
- [5] Sayenko Y., Baranenko T., Liubartsev V. Forecasting of electricity generation by solar panels using neural networks with incomplete initial data. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 07-11 September 2020. Pp. 140–143. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263085>.
- [6] Sharew E. A., Kefale H. A., Werkie Y. G. Power quality and performance analysis of grid-connected solar PV system based on recent grid integration requirements. *International Journal of Photoenergy*. 2021. Vol. 16(1). Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/4281768>.
- [7] Причини підвищення напруги у вузлі підключення ФЕС до розподільної мережі та інверторне регулювання напруги / Гаєвський О. Ю., Гаєвська Г. М., Бодняк В. В., Коновалов М. О. *Відновлювана енергетика*. 2022. Вип. 1(68). С. 27-36. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\).27-36](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).27-36).
- [8] Zhao B., Wang C., Zhang X. Grid-integrated and standalone photovoltaic distributed generation systems: Analysis, Design, and Control. 2017. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119187349>.
- [9] Сенько В. І., Трубіщин К. В., Чибеліс В. І. Інвертори і перетворювачі частоти : монографія. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. 300 с.
- [10] Лежнюк П., Комар В., Сікорська О. Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2023. 195 с.
- [11] Harmonic mitigation and power quality improvement in utility grid with solar energy penetration using distribution static compensator / O. P. Mahela et al. *IET Power Electron*. 2021. Vol. 14 (5). Pp. 912-922. DOI: <https://doi.org/10.1049/pel2.12074>.
- [12] Standardization of power quality indicators and the causes of their deviations from established norms / V. Kovalenko et al. *Системні технології*. 2025. Vol. 1(156). Pp. 177-189. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-156-2025-20>.
- [13] Яндудський О. С., Труніна Г. О., Нестерко А. Б. Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 184 с.
- [14] Лежнюк П., Рубаненко О., Гунько І. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. Вип. 3. С. 7-13.
- [15] Гребченко М. В., Єрьоменко Є. В. Швидкодіючий адаптивний захист від коротких замикань в електричних мережах microgrid з розподіленою генерацією. *Технічна електродинаміка*. 2021. Вип. 1. С. 57-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/tech-ned2021.01.057>.
- [16] Сабарно Л., Кошман В., Севаст'юк І. Модель універсальної адаптивної системи релейного захисту для мереж з розподіленою генерацією. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*. 2019. Вип. 204. С. 32-34.
- [17] Визначення оптимальної точки приєднання сонячної електростанції до мережі методом комп'ютерного моделювання / Плешков П., Зінзура В., Плешков С., Солдатенко В. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39). С. 48-57. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.48-57](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.48-57).

POWER QUALITY ISSUES ASSOCIATED WITH THE INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS INTO 0,4-kV DISTRIBUTION NETWORKS

Sayenko Yu.

D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-4700>, e-mail: sayenko_y_l@pstu.edu;

Liubartseva Yu.

postgraduate student, senior lecturer, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0624-1983>, e-mail: liubartseva_y_i@pstu.edu

The modern development of the energy sector is characterized by the active integration of photovoltaic power plants (PVPPs), particularly small and medium-sized ones, into low-voltage (0.4 kV) distribution networks. This process aligns with global trends and contributes to enhancing Ukraine's energy resilience, reducing electricity losses, and improving energy efficiency. However, the increasing share of PVPPs introduces a number of critical challenges in maintaining

adequate power quality indicators (PQI) in 0.4 kV networks. A review of the literature and practical studies has shown that the main problems arising from the connection of PVPPs include voltage rise and fluctuations caused by variable solar irradiance, as well as harmonic distortions. In particular, studies demonstrate that when PVPP penetration reaches 50%, the total harmonic distortion (THD) may exceed regulatory limits. Additional issues such as voltage unbalance, due to uneven connection of single-phase inverters, and reverse power flows also occur. These phenomena negatively affect network reliability and the performance of electrical equipment. To mitigate these technical challenges and ensure reliable system operation, the implementation of comprehensive solutions is recommended. These include inverters with voltage and reactive power control functions (smart inverters) capable of maintaining voltage within permissible limits. A key measure to address harmonic distortions is the use of active filters, such as distribution static compensators (DSTATCOM), integrated with battery energy storage systems (BESS). Organizational measures, such as phase load balancing and optimization of generation connection points, also prove effective. The deployment of these technologies, along with modernization of network equipment and the development of intelligent control systems (Smart Grid), is essential for enhancing the operational reliability of the power system under conditions of increasing decentralization.

Keywords: power quality, photovoltaic power plants, distributed generation, 0,4 kV networks, harmonic distortion, voltage rise, smart inverters, active filters, Smart Grid.

References

- [1] Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhoberezhennia Ukrainy. Informatsiini materialy. (State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. Information materials). [Online]. Available: <https://old.sae.gov.ua/uk/content/informatsiyni-materialy/>. Accessed on: May 15, 2025.
- [2] S. Ihnatiev, Za pershe pivrichchia 2025 roku enerhosystema dodala 1 HVt rozpodilenoї heneratsii. Ukrainyskyi instytut maibutnoho 2025 (In the first half of 2025, the power system added 1 GW of distributed generation. Ukrainian Institute of the Future 2025). Ukrainian Institute for the Future (UIF). [Online]. Available: <https://uifuture.org/publications/energosystema-1-gvt/>. Accessed on: May 15, 2025.
- [3] I. Hrytsiuk, V. Volynets, Y. Hrytsiuk, I. Bandura and N. Komenda, "Prospects for the integration of distributed energy sources into the Ukrainian power grid," *Machinery & Energetics*, vol. 16, pp. 130-145, 2025. doi: 10.31548/machinery/1.2025.130.
- [4] Y. Sayenko, R. Pawelek, T. Baranenko, and V. Liubartsev, "The Impact of Meteorological Data on the Accuracy of Solar Electricity Generation Forecasting Using Neural Networks," *Energies*, vol. 18(9), article 2309, 2025. doi: 10.3390/en18092309.
- [5] Y. Sayenko, T. Baranenko, and V. Liubartsev, "Forecasting of Electricity Generation by Solar Panels Using Neural Networks with Incomplete Initial Data," in *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, Sept. 07-11, 2020, pp. 140-143. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263085.
- [6] E. Sharew, H. Kefale, and Y. Werkie, "Power Quality and Performance Analysis of Grid-Connected Solar PV System Based on Recent Grid Integration Requirements," *International Journal of Photoenergy*, vol. 16(1), pp. 1-14, 2021. doi: 10.1155/2021/4281768.
- [7] O. Haievskyi, H. Haievskaya, V. Bodniak, and M. Kononov, "Prychyny pidvyshchennia napruhy u vuzli pidkluchennia FES do rozpodilnoi merezhi ta invertorne rehuliuвання napruhy" ["Reasons for voltage increase at the connection point of the PV power plant to the distribution network and inverter voltage regulation"], *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable energy*, vol. 1(68), pp. 27-36, 2022. doi: 10.36296/1819-8058.2022.1(68).27-36. (Ukr.).
- [8] B. Zhao, C. Wang, and X. Zhang, *Grid-Integrated and Standalone Photovoltaic Distributed Generation Systems: Analysis, Design, and Control*. Wiley, 2017. doi: 10.1002/9781119187349.
- [9] V.I. Senko, *Invertory i peretvoriuvachi chastoty* [Inverters and frequency converters]. Kyiv, Ukraine: Lira-K Publishing House, 2020. (Ukr.).
- [10] P. Lezhniuk, V. Komar, and O. Sikorska, *Rozoseredzhene heneruvannia v zadachakh pidvyshchennia enerhoefektyvnosti rozpodilnykh elektrychnykh merezh* [Distributed generation in tasks to improve the energy efficiency of electrical distribution networks]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2023. (Ukr.).
- [11] O. Mahela, B. Khan, H. Alhelou, S. Tanwar and S. Padmanaban, "Harmonic mitigation and power quality improvement in utility grid with solar energy penetration using distribution static compensator," *IET Power Electron*, vol. 14(5), pp. 912-922, 2021. doi: 10.1049/pel2.12074.
- [12] V. Kovalenko, V. Radchenko, N. Miniailo, A. Yerofieieva, V. Artemchuk, and V. Prykhno, "Standardization of power quality indicators and the causes of their deviations from established norms," *Systemni tekhnolohii – System technologies*, vol. 1(156), pp. 177-189, 2025. doi: 10.34185/1562-9945-1-156-2025-20.
- [13] O.S. Yandulskyi, H.O. Trunina, and A. B. Nesterko, *Rehuliuвання napruhy v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh z vidnovliuvanyimi dzherelamy enerhii* [Voltage regulation in distribution networks with renewable energy sources]. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. (Ukr.).
- [14] P. Lezhniuk, O. Rubanenko, and I. Hunko, "Vplyv soniachnykh elektrychnykh stantsii na napruhu spozhyvachiv 0,4 kV" ["The impact of solar power stations on the voltage of 0.4 kV consumers"],

Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia – Energetics: economics, technology, ecology, vol. 3, pp. 7-13, 2015. (Ukr.)

- [15] M. V. Hrebchenko, and Ye. V. Yeromenko, “Shvydkodiuchy adaptivnyi zakhyst vid korotkykh zamykan v elektrychnykh merezhakh microgrid z rozpodilenoju heneratsiieju” [“Fast adaptive protection against short circuits in electrical networks of microgrids with distributed generation”], *Tekhnichna elektrody-namika – Technical electrodynamics*, vol. 1, pp. 57-60, 2021. doi: 10.15407/techned2021.01.057. (Ukr.).

- [16] L. Sabarno, V. Koshman, and I. Sevastiuk, “Model universalnoi adaptivnoi systemy releinoho zakhystu dlia merezh z rozpodilenoju heneratsiieju” [“Model of a universal adaptive relay protection system for networks with distributed generation”], *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva. Problemy*

enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Problems of energy supply and energy conservation in the agro-industrial complex of Ukraine, vol. 204, pp. 32-34, 2019. (Ukr.)

- [17] P. Plieshkov, V. Zinzura, S. Plieshkov, and V. Soldatenko, “Vyznachennia optymalnoi tochky pryiednannia soniachnoi elektrostansii do merezhi metodom kompiuternoho modeliuвання” [“Determining the optimal point for connecting a solar power plant to the grid using computer modelling”], *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, vol. 8(39), pp. 48-57, 2023. doi: 10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.48-57. (Ukr.).

Стаття надійшла 05.07.2025

Стаття прийнята 08.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Саєнко Ю. Л., Любарцева Ю. І. Проблеми якості електроенергії при впровадженні фотоелектричних станцій в мережі 0,4 кВ. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 110-118. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344730>.

СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧА ШВИДКОСТІ РОТОРА В СКЛАДІ ВЕКТОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МАШИНОЮ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

Клюєв О.В.канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет,
м. Кам'янське, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4542-3317>, e-mail: kluev2006@ukr.net

У статті використано відомі рівняння спостерігача швидкості машини подвійного живлення (МПЖ), складені при керуванні за ротором за аналогією з адаптивним спостерігачем швидкості з еталонною моделлю для асинхронних машин (АМ) з керуванням за статором. Для розв'язання задачі параметричного синтезу спостерігача швидкості МПЖ запропоновано оригінальну методику, що базується на аналізі стійкості лінеаризованої моделі спостерігача за її характеристичним рівнянням. Усі аналітичні викладки перевірено методом математичного моделювання динамічних режимів бездатчикової релейно-векторної системи керування МПЖ.

Ключові слова: машина подвійного живлення, еталонна модель, вектор потокозчеплення статора, алгоритм адаптації, характеристичне рівняння, критерій стійкості, параметри регулятора.

Постановка проблеми

Замкнуті системи векторного керування асинхронними машинами потребують установки датчика швидкості на валу, що не завжди реалізується на практиці. Для вирішення цієї проблеми використовуються бездатчикові алгоритми, які виключають механічні датчики, спираючись винятково на виміри електричних величин. Для ефективного полеорієнтованого керування асинхронною машиною за ротором необхідно точно ідентифікувати опорний вектор потокозчеплення, а також кут повороту і швидкість ротора. Отже, бездатчикові методи керування АМ будуються на математичних моделях і дозволяють одночасно оцінювати частоту обертання ротора і визначати положення опорного вектора потокозчеплення, що є ключовим для векторного керування.

У системах векторного керування машини подвійного живлення (МПЖ) разом з визначенням швидкості обертання ротора та кутового положення вектора потокозчеплення статора, необхідно встановлювати й кутове положення ротора відносно статора. В [1] наведено метод обчислення гармонічних функцій кута повороту ротора та його кутової швидкості. Згідно з підходом, описаним у [2], для визначення швидкості потрібне диференціювання струмів, що в системах з релейним керуванням є окремим складним завданням. Для обчислення кутової швидкості ротора можна застосовувати спостерігачі, ґрунтуючись на порівнянні векторів потокозчеплень [1]. Кут повороту ротора не потрібно визначати в асинхронних електроприводах (ЕП) з векторним керуванням за статором. У статті [1] представлено спостерігач для обчислення швидкості та ідентифікатор кута повороту ротора для побудови бездатчикового асинхронного ЕП з векторним керуванням за ротором. Однак у зазначеній роботі здійснено структурний синтез спостерігача механічних координат МПЖ, але не наводиться розрахункова методика або рекомендації з вибору параметрів ПІ-регулятора в складі спостерігача. Вони підбиралися в процесі багаторазового розрахунку математичної моделі замкнутої системи керування, виходячи з необхідних показників якості регулювання швидкості ротора

МПЖ. Від вибору числових значень цих параметрів залежить точність і швидкодія спостерігача швидкості, що обумовлює актуальність розробки методики визначення параметрів спостерігача швидкості МПЖ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для синтезу спостерігачів швидкості широко застосовується метод MRAS (Model Reference Adaptive System) [3], у якому, використовуючи другий метод Ляпунова, формують функцію адаптації, що забезпечує асимптотичне наближення адаптивної моделі до еталонної. Швидкість також можна визначати шляхом обчислення динамічного моменту на валу ротора асинхронного двигуна за умови постійності магнітного потоку та аналізу стійкості загальної динаміки із застосуванням методу сингулярних збурень [4]. У статті [5] за принципом MRAS побудований спостерігач швидкості синхронного двигуна з постійними магнітами, модель якого записана в осях d, q , а функція адаптації сформована через проекції вектора струму статора. Закон адаптації розроблений на основі теорії стійкості Попова. Недоліком методу можна вважати те, що оцінка кута повороту ротора одержана інтегруванням оцінки швидкості ротора, що, у свою чергу, вводить у систему керування нейтральну ланку і зменшує її запас стійкості. Також нічого не сказано про те, які приймають числові значення параметрів ПІ-регулятора спостерігача швидкості. У [6] для вентиляційного двигуна синтезовано спостерігач швидкості з еталонною моделлю, у якому функція адаптації представляє векторний добуток вектора потокозчеплення ротора і вектора похибки оцінювання струму статора. Доводиться, що така функція адаптації краща у порівнянні з використанням тільки струму статора. Стійкість запропонованого алгоритму перевіряється за допомогою теорії стійкості Ляпунова. У [7] адаптивна модель наближається до еталонної за допомогою ковзного режиму, що реалізується сигмоїдальною функцією, де як аргумент використовується значення функції адаптації спостерігача, що реалізується як векторний добуток вимірюваного й обчисленого векторів струму статора. Використання натомість інтегруючої ланки регулятора, що працює в

ковзному режимі, додає спостерігачу властивість робастності до параметричних і координатних збурень. У [8] для автономного асинхронного генератора з подвійним живленням розглянуто MRAS спостерігач швидкості з функцією адаптації, сформованою на основі вектора потокозчеплення статора. Вивчено чутливість спостерігача до зміни параметрів асинхронної машини і навантаження на її валу. У статті відсутні рекомендації з вибору числових значень коефіцієнтів підсилення складових ПІ-регулятора у спостерігачі швидкості. У [9] обґрунтовується, що спостерігач швидкості, заснований на вимірі реактивної потужності для асинхронного генератора з подвійним виходом, може працювати за швидкостей, вищих за синхронну, коли відбувається рекуперація активної потужності з роторного і статорного кіл одночасно. У [10] розроблено систему керування для одночасної оцінки активного опору і кутової швидкості обертання ротора АМ. Використовуються два адаптивних спостерігачі, у яких для визначення числових значень коефіцієнтів підсилення регуляторів використовується нечітка логіка. У [11] швидкість АМ оцінюється за допомогою системи адаптації моделі до еталонного зразка (MRAS). Основний результат статті полягає в тому, що доводиться працездатність спостерігача швидкості при дії на вал АМ сили тертя, що змінюється за складною нелінійною залежністю від кутової швидкості. В алгоритмі адаптації спостерігача швидкості на зміну ПІ-регулятора може використовуватися контролер на основі нейронної мережі [12], що поліпшує динаміку спостерігача при низьких швидкостях ротора.

Мета статті

Метою даної роботи є параметричний синтез адаптивного спостерігача швидкості з еталонною моделлю для бездатчикової релейно-векторної системи керування МПЖ, з одержанням аналітичних співвідношень між параметрами алгоритму адаптації, які уможливають визначення їх числових значень з умов стійкості спостерігач.

Виклад основного матеріалу

У статті [1] запропоновано методику структурного синтезу спостерігача швидкості ротора машини подвійного живлення, викладену за аналогією з відомою методикою синтезу спостерігача швидкості з еталонною моделлю для асинхронної машини із короткозамкненим ротором та керуванням по статору. Структура алгоритму адаптації визначається на основі умов другої теореми Ляпунова про стійкість руху. За результатами статті [1] можливо записати рівняння динаміки спостерігача швидкості. Рівняння еталонної моделі ротора, засновані на інтегруванні ЕРС обмоток ротора, приведено до ортогональних осей d, q [1]:

$$\dot{\Psi}_{sd}^R = \frac{1}{k_s} \int (U_{rd} - R_r I_{rd}) dt - \frac{\Delta}{L_m} I_{rd};$$

$$\dot{\Psi}_{sq}^R = \frac{1}{k_s} \int (U_{rq} - R_r I_{rq}) dt - \frac{\Delta}{L_m} I_{rq}, \quad (1)$$

де $\Delta = L_s L_r - L_m^2$.

Рівняння адаптивної моделі статора [1]:

$$\begin{aligned} p\hat{\Psi}_{sd}^S &= -\frac{1}{T_s} \hat{\Psi}_{sd}^S + \hat{\omega} \hat{\Psi}_{sq}^S + k_s R_s I_{rd} + U_{sd}; \\ p\hat{\Psi}_{sq}^S &= -\frac{1}{T_s} \hat{\Psi}_{sq}^S - \hat{\omega} \hat{\Psi}_{sd}^S + k_s R_s I_{rq} + U_{sq}. \end{aligned} \quad (2)$$

Базовий алгоритм адаптації наступний [1]:

$$\begin{aligned} \hat{\omega} &= \lambda \int (\hat{\Psi}_{sq}^S \hat{\Psi}_{sd}^R - \hat{\Psi}_{sd}^S \hat{\Psi}_{sq}^R) dt = \lambda \int \begin{vmatrix} \hat{\Psi}_{sq}^S & \hat{\Psi}_{sd}^S \\ \hat{\Psi}_{sq}^R & \hat{\Psi}_{sd}^R \end{vmatrix} dt = \\ &= -\lambda \int (\hat{\Psi}_s^S \times \hat{\Psi}_s^R) dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Об'єднаємо в одну систему рівняння (2) і (3), записані у формі Коші:

$$\begin{aligned} p\hat{\Psi}_{sd}^S &= -\frac{1}{T_s} \hat{\Psi}_{sd}^S + \hat{\omega} \hat{\Psi}_{sq}^S + k_s R_s I_{rd} + U_{sd}; \\ p\hat{\Psi}_{sq}^S &= -\frac{1}{T_s} \hat{\Psi}_{sq}^S - \hat{\omega} \hat{\Psi}_{sd}^S + k_s R_s I_{rq} + U_{sq}; \\ p\hat{\omega} &= \lambda \hat{\Psi}_{sq}^S \hat{\Psi}_{sd}^R - \lambda \hat{\Psi}_{sd}^S \hat{\Psi}_{sq}^R. \end{aligned} \quad (4)$$

Якщо прийняти, що адаптивна модель статора (2) асимптотично стійка та у своїй динаміці прямує до траєкторій еталонної моделі ротора (1), то можна записати:

$$\hat{\Psi}_{sd\infty}^S = \hat{\Psi}_{sd}^R; \quad \hat{\Psi}_{sq\infty}^S = \hat{\Psi}_{sq}^R; \quad \hat{\omega}_\infty = \omega. \quad (5)$$

На підставі (4) з урахуванням (5) запишемо систему рівнянь першого наближення

$$p \begin{pmatrix} \Delta \hat{\Psi}_{sd}^S \\ \Delta \hat{\Psi}_{sq}^S \\ \Delta \hat{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/T_s & \omega & \hat{\Psi}_{sq}^R \\ -\omega & -1/T_s & -\hat{\Psi}_{sd}^R \\ -\lambda \hat{\Psi}_{sq}^R & \lambda \hat{\Psi}_{sd}^R & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \hat{\Psi}_{sd}^S \\ \Delta \hat{\Psi}_{sq}^S \\ \Delta \hat{\omega} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Для виявлення властивостей параметра λ здійснимо аналіз стійкості системи (6), для чого запишемо її характеристичне рівняння

$$|A - pE| = \begin{vmatrix} -1/T_s - p & \omega & \hat{\Psi}_{sq}^R \\ -\omega & -1/T_s - p & -\hat{\Psi}_{sd}^R \\ -\lambda \hat{\Psi}_{sq}^R & \lambda \hat{\Psi}_{sd}^R & -p \end{vmatrix} = 0. \quad (7)$$

Розкриємо визначник з урахуванням співвідношення $(\hat{\Psi}_{sd}^R)^2 + (\hat{\Psi}_{sq}^R)^2 = \Psi_s^2$. Тоді одержимо

$$p^3 + \frac{2}{T_s} p^2 + \left(\frac{1}{T_s^2} + \omega^2 + \lambda \Psi_s^2 \right) p + \frac{\lambda}{T_s} \Psi_s^2 = 0. \quad (8)$$

Границя стійкості досягається за негативного значення λ , що впливає з критерію стійкості Гурвіца. При цьому для стійкості системи (6), виходячи з рівняння (8), потрібне виконання нерівності $\lambda > 0$, що впливає з необхідних умов стійкості. Ця нерівність є єдиним обмеженням для параметру λ . З аналізу

коренів рівняння (8) впливає, що при $\lambda \rightarrow \infty$ дійсний негативний корінь прямує до граничного значення

$$p_1 = -\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{a_0}{a_1} = -\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{\lambda \Psi_s^2 / T_s}{1/T_s^2 + \omega^2 + \lambda \Psi_s^2} = -\frac{1}{T_s}. \quad (9)$$

Саме цей корінь визначає запас стійкості системи (6), оскільки два інших корені комплексно спряжені з негативними дійсними частинами і за модулем прямують до нескінченності.

Для підвищення швидкодії у складі спостерігача швидкості використовують ПІ-регулятор. Тоді, з урахуванням пропорційної складової, система (4) запишеться так:

$$\begin{aligned} p\hat{\Psi}_{sd}^s &= -\frac{1}{T_s}\hat{\Psi}_{sd}^s + \hat{\omega}\hat{\Psi}_{sq}^s + k_s R_s I_{rd} + U_{sd}; \\ p\hat{\Psi}_{sq}^s &= -\frac{1}{T_s}\hat{\Psi}_{sq}^s - \hat{\omega}\hat{\Psi}_{sd}^s + k_s R_s I_{rq} + U_{sq}; \\ p\hat{\omega} &= \tau p(\hat{\Psi}_{sq}^s \hat{\Psi}_{sd}^R - \hat{\Psi}_{sd}^s \hat{\Psi}_{sq}^R) + \lambda(\hat{\Psi}_{sq}^s \hat{\Psi}_{sd}^R - \hat{\Psi}_{sd}^s \hat{\Psi}_{sq}^R). \end{aligned} \quad (10)$$

Розглянемо похідну від векторного добутку векторів

$$\begin{aligned} p(\hat{\Psi}_{sq}^s \hat{\Psi}_{sd}^R - \hat{\Psi}_{sd}^s \hat{\Psi}_{sq}^R) &= p[\vec{\Psi}_s^s \times \vec{\Psi}_s^R] = p(|\vec{\Psi}_s^R| \cdot |\vec{\Psi}_s^s| \sin \phi) = \\ &= |\vec{\Psi}_s^R| \cdot |\vec{\Psi}_s^s| \cos \phi = \vec{\Psi}_s^R \cdot \vec{\Psi}_s^s. \end{aligned} \quad (11)$$

Скалярний добуток векторів через проекції запишеться так

$$\vec{\Psi}_s^R \cdot \vec{\Psi}_s^s = \hat{\Psi}_{sd}^R \hat{\Psi}_{sd}^s + \hat{\Psi}_{sq}^R \hat{\Psi}_{sq}^s. \quad (12)$$

Система рівнянь (10) у відхиленнях приймає вигляд

$$p \begin{pmatrix} \Delta \hat{\Psi}_{sd}^s \\ \Delta \hat{\Psi}_{sq}^s \\ \Delta \hat{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/T_s & \omega & \hat{\Psi}_{sq}^R \\ -\omega & -1/T_s & -\hat{\Psi}_{sd}^R \\ \tau \hat{\Psi}_{sd}^R - \lambda \hat{\Psi}_{sq}^R & \tau \hat{\Psi}_{sq}^R + \lambda \hat{\Psi}_{sd}^R & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \hat{\Psi}_{sd}^s \\ \Delta \hat{\Psi}_{sq}^s \\ \Delta \hat{\omega} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Для виявлення обмежень, що накладаються на параметр τ , запишемо характеристичне рівняння системи (13):

$$|A - pE| = \begin{vmatrix} -1/T_s - p & \omega & \hat{\Psi}_{sq}^R \\ -\omega & -1/T_s - p & -\hat{\Psi}_{sd}^R \\ \tau \hat{\Psi}_{sd}^R - \lambda \hat{\Psi}_{sq}^R & \tau \hat{\Psi}_{sq}^R + \lambda \hat{\Psi}_{sd}^R & -p \end{vmatrix} = 0. \quad (14)$$

Після розкриття визначника і перетворень будемо мати

$$p^3 + \frac{2}{T_s} p^2 + \left(\frac{1}{T_s^2} + \omega^2 + \lambda \Psi_s^2 \right) p + \frac{\lambda}{T_s} \Psi_s^2 + \tau \omega \Psi_s^2 = 0. \quad (15)$$

З критерію стійкості Гурвіца для рівняння третього порядку впливає умова $a_2 a_1 - a_0 a_3 > 0$, яка для рівняння (15) приймає вигляд

$$\tau < \frac{2}{T_s^3 \Psi_s^2 \omega} + \frac{2\omega}{T_s \Psi_s^2} + \frac{\lambda}{T_s \omega}. \quad (16)$$

Зі співвідношення (16) випливає, що в площині параметрів (λ, τ) межа стійкості являє собою зростаючу пряму лінію, нижче якої спостерігач швидкості буде стійким. Розташування межі стійкості залежить від швидкості. Перший доданок у правій частині (16) нехтовно малий порівняно з іншими доданками. Якщо продиференціювати праву частину (16) за швидкістю без урахування першого доданка і прирівняти отриманий вираз до нуля, то з цього рівняння одержимо вираз

$$\lambda = \sqrt{2} \omega / \Psi_s. \quad (17)$$

При значеннях λ , які перевищують значення, розраховані за формулою (17), зі збільшення швидкості кожна наступна пряма границі стійкості буде розташовуватися нижче попередньої в площині параметрів (λ, τ) . У моделях спостерігача швидкості значення λ приймаються істотно більшими, ніж величина, знайдена за формулою (17). Тому для практично застосовуваних значень λ у правій частині (16) переважний вплив має останній доданок. Тоді умову границі стійкості без істотної похибки можна спростити до наступної нерівності

$$\tau < \frac{\lambda}{T_s \omega}. \quad (18)$$

Знаходилися корені рівняння (8) для різних значень параметра λ при фіксованих величинах кутової швидкості ротора 10, 50, 100 і 150 рад/с. На рисунку 1 показано залежності дійсних частин коренів рівняння (8) від параметра λ , де червона крива побудована за швидкості ротора 10 рад/с, а синя – за швидкості 150 рад/с. На діаграмі А) представлено дійсний корінь, а на діаграмі Б) – дійсні частини двох комплексно-спряжених коренів. Якщо $\lambda = 0$, то $p_1 = 0$ та $Re(p_{2,3}) = -1/T_s$. Якщо $\lambda \rightarrow \infty$, то $p_1 \rightarrow -1/T_s$ та $Re(p_{2,3}) \rightarrow -0,5/T_s$. Таким чином, при $\lambda > 0$ корінь p_1 монотонно спадає, лежить у смузі $-1/T_s < p_1 < 0$ і має горизонтальну асимптоту $p_1 = -1/T_s$. Дійсні частини комплексно-спряжених коренів монотонно зростають, лежать у смузі $-1/T_s < Re(p_{2,3}) < -0,5/T_s$ і мають горизонтальну асимптоту $Re(p_{2,3}) = -0,5/T_s$.

Щоб дійсний корінь p_1 вийшов із області малих значень, параметр λ повинен бути не меншим ніж $\lambda_{min} = 2 \cdot 10^4$, що впливає з розгляду синього графіка на рис.1, А). Тоді, як впливає зі співвідношення (18), пропорційна складова повинна бути не меншою ніж $\tau_{min} = 100$. Зазначено нижні межі параметрів ПІ-регулятора спостерігача швидкості, за яких буде задовільним процес відстеження швидкості ротора. У

практиці моделювання, для підвищення швидкодії спостерігача швидкості, параметр λ може прийматися на порядок більшим, що призводить до відповідного збільшення параметра τ . Параметр λ не обмежений

згори, але приймати його більше значення $2 \cdot 10^5$ нецільно, оскільки дійсні частини коренів характеристичного рівняння (8) майже досягають рівня своїх асимптот.

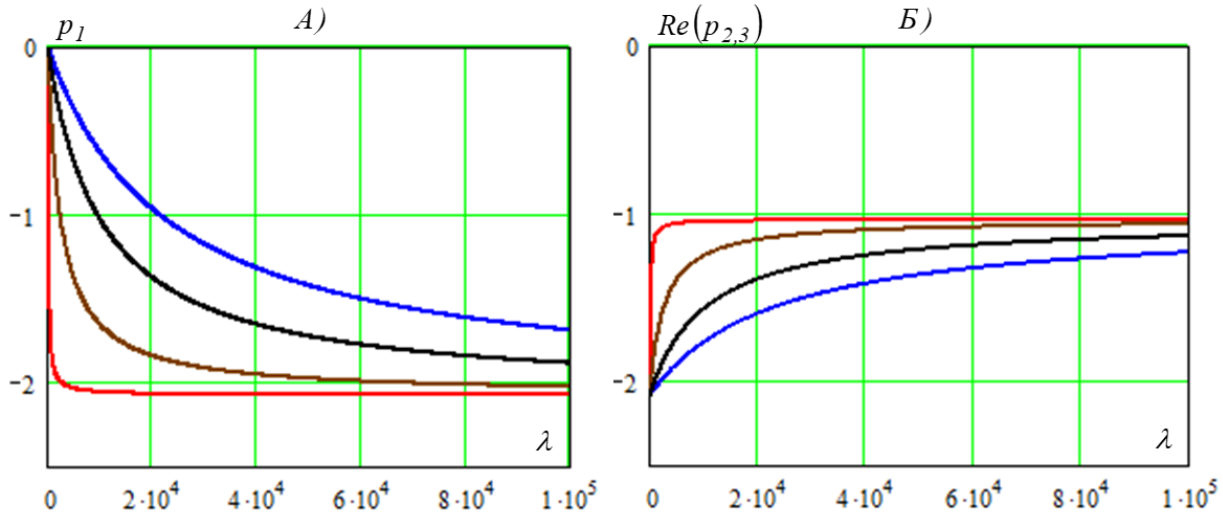


Рис. 1 – Графіки залежності дійсних частин коренів характеристичного рівняння (8) від коефіцієнта підсилення λ інтегрального регулятора спостерігача швидкості

У рівняннях (4) і (10) виникає задача визначення проєкцій вектора напруги статора на осі d, q ротора, тобто величин U_{sd} , U_{sq} . Їх знаходять за формулами:

$$U_{sd} = U_{sa} \cos \gamma + U_{s\beta} \sin \gamma; U_{sq} = U_{s\beta} \cos \gamma - U_{sa} \sin \gamma, \quad (19)$$

де $U_{sa}, U_{s\beta}$ – вимірювані величини напруги статора в ортогональних осях α, β ; $\sin \gamma, \cos \gamma$ – синус і косинус кута повороту ротора відносно статора, що визначаються за виразами [1]:

$$\cos \gamma = \frac{\hat{\Psi}_{sa} \hat{\Psi}_{sd} + \hat{\Psi}_{s\beta} \hat{\Psi}_{sq}}{\hat{\Psi}_s^2}; \sin \gamma = \frac{\hat{\Psi}_{s\beta} \hat{\Psi}_{sd} - \hat{\Psi}_{sa} \hat{\Psi}_{sq}}{\hat{\Psi}_s^2}. \quad (20)$$

У формулах (20) проєкції вектора потокозчеплення статора на вісі α, β визначаються як інтеграли від ЕРС статора у відповідних осях:

$$\hat{\Psi}_{sa} = \int (U_{sa} - R_s I_{sa}) dt; \hat{\Psi}_{s\beta} = \int (U_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt; \quad \hat{\Psi}_s^2 = \hat{\Psi}_{sa}^2 + \hat{\Psi}_{s\beta}^2, \quad (21)$$

а проєкції на вісі d, q – з рівнянь еталонної моделі ротора (1).

Закон адаптації в операторному вигляді для ПІ-регулятора запишеться так

$$\hat{\omega} = \left(\tau + \frac{\lambda}{p} \right) \left(\hat{\Psi}_{sq}^S \hat{\Psi}_{sd}^R - \hat{\Psi}_{sd}^S \hat{\Psi}_{sq}^R \right). \quad (22)$$

У середовищі моделювання Matlab/Simulink складено програма розрахунку перехідних процесів у МПЖ із релейно-векторною системою керування і спостерігачем швидкості в колі зворотного зв'язку. На рисунках 2 і 3 показано результати розрахунку динамічних режимів електропривода за схемою МПЖ виконаної на базі АМ з фазним ротором з такими технічними даними: $P_n = 11 \text{ кВт}$, $U_{1n} = 380 \text{ В}$, $U_{2n} = 305 \text{ В}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$. У системі керування за ротором є два канали регулювання з релейними регуляторами. У каналі реактивної потужності регулятором стабілізується струм намагнічування I_μ як сума реактивних складових векторів струмів статора і ротора. У каналі активної потужності регулятор активної складової струму ротора I_{rv} підпорядкований регулятору кутової швидкості ротора ω_r . Пуск МПЖ здійснюється із закороченим статором при живленні ротора від перетворювача частоти з векторним керуванням із прикладеним до вала АМ вентиляторним моментом навантаження.

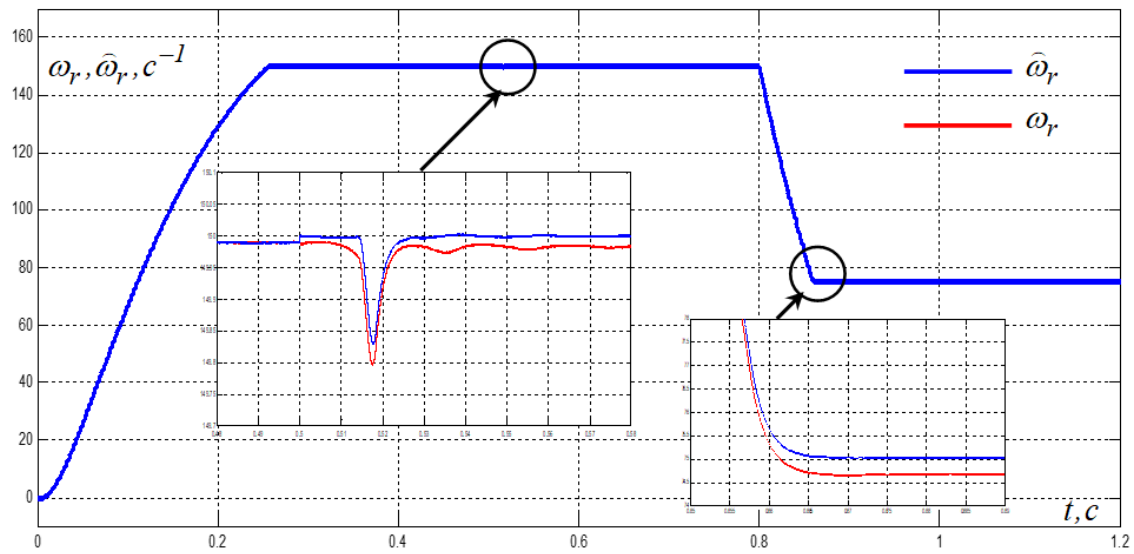


Рис. 2 – Графіки перехідних процесів кутової швидкості ротора МПЖ та її обчисленого спостерігачем значення

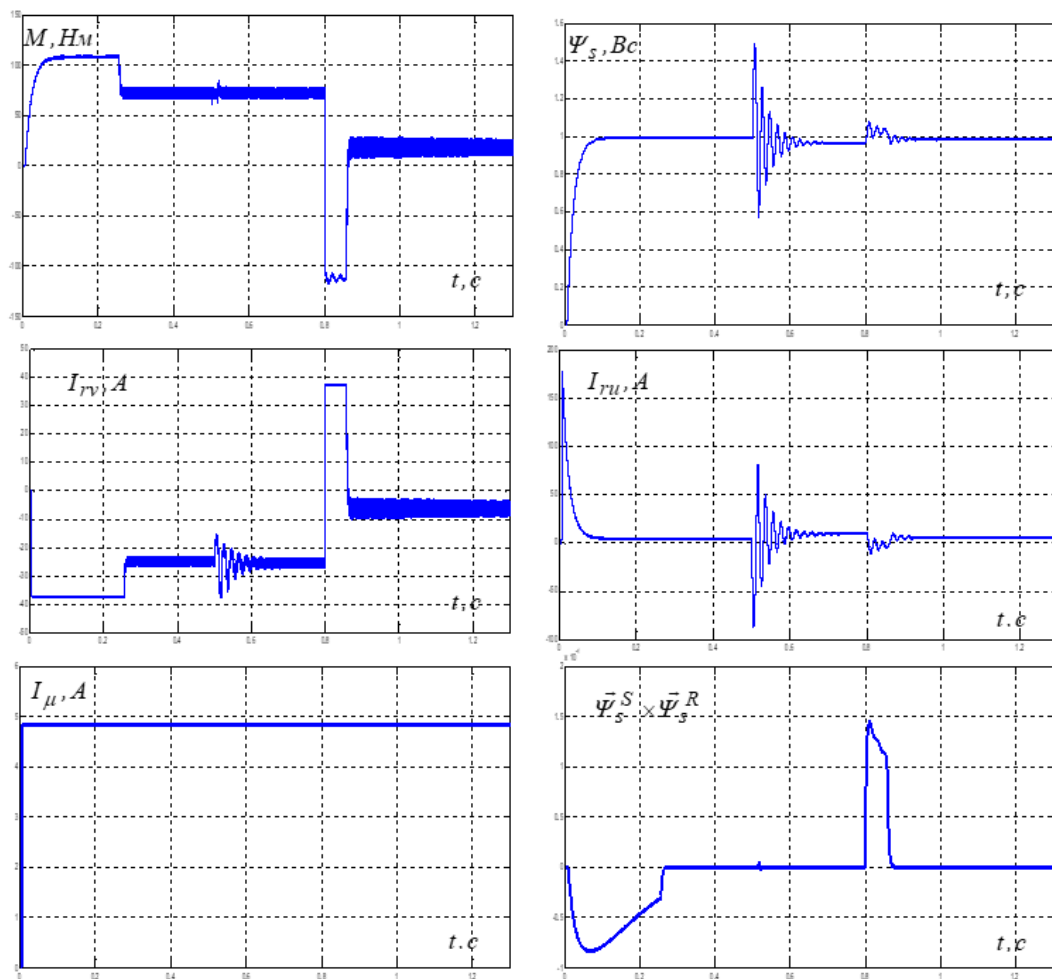


Рис. 3 – Графіки перехідних процесів електромагнітних змінних МПЖ

Через 0,5 с статор МПЖ підключається до мережі, що викликає згасаючі коливання модуля вектора потокозчеплення статора Ψ_s і реактивної складової струму ротора I_{rv} . При коливаннях потокозчеплення Ψ_s система керування забезпечує коливання у протифазі активної складової струму ротора I_{rv} , що призводить до перехідного процесу електромагнітного моменту M без збурень. ПІ-регулятор (22) векторного добутку векторів потокозчеплення статора, знайдених з еталонної моделі ротора й адаптивної моделі статора $\tilde{\Psi}_s^S \times \tilde{\Psi}_s^R$, забезпечує його нульове значення у сталих режимах за швидкістю, що призводить до практичного збігу швидкості та її оцінки, визначеної спостерігачем. Система керування не містить датчиків механічних координат, оскільки спостерігач знаходить оцінку швидкості $\hat{\omega}_r$, а замість датчика кута повороту ротора застосовується його ідентифікація за формулами (20). Числові значення параметрів ПІ-регулятора у складі спостерігача швидкості прийнято такими: $\lambda = 2 \cdot 10^5 (B\delta^{-2} \cdot c^{-2})$, $\tau = 10^3 (B\delta^{-2} \cdot c^{-1})$. Як впливає з рисунка 2, при закріпленому статорі швидкість та її оцінка збігаються. Після підключення статора до мережі виникає незначна статична помилка ідентифікації швидкості ротора МПЖ: $0,02 c^{-1}$ (0,013%) за номінальної кутової швидкості ротора; $0,15 c^{-1}$ (0,2%) за кутової швидкості ротора, що дорівнює половині номінальної. Статична похибка ідентифікації швидкості незначна, але зі зменшенням величини стабілізації кутової швидкості ротора ця похибка збільшується. Збільшення статичної похибки ідентифікації швидкості незначне, наприклад, для рівня швидкості стабілізації $5 c^{-1}$ статична похибка дорівнює $0,4 c^{-1}$. Якщо врахувати, що МПЖ використовуються у потужних електроприводах механізмів із невеликим діапазоном регулювання швидкості, то така статична похибка регулювання швидкості цілком припустима.

Висновки

У статті взято за основу відомі рівняння спостерігача швидкості ротора МПЖ складені у класі адаптивних систем з еталонною моделлю. Структуру функції адаптації визначено на основі другої теореми Ляпунова про стійкість руху та сформовано з використанням вектора потокозчеплення статора. Запропоновано методику визначення параметрів ПІ-регулятора від функції адаптації, засновану на дослідженні стійкості нелінійного спостерігача за коефіцієнтами характеристичного рівняння системи першого наближення. У площині параметрів ПІ-регулятора з алгебраїчного критерію стійкості Гурвіца визначено аналітичний вираз межі стійкості для фіксованих швидкостей ротора у вигляді нерівності (16). Виявлено асимптоти коренів

характеристичного рівняння при прямуванні інтегральної складової до нескінченності. Визначено доцільні нижні та верхні межі цих параметрів, виходячи зі ступеня наближення дійсних частин коренів характеристичного рівняння до зазначених асимптот. Спостерігач швидкості запропоновано використовувати з ідентифікатором кутового положення ротора (20). Працездатність отриманої таким чином бездатчикової релейно-векторної системи керування МПЖ перевірено методом математичного моделювання.

Перелік використаних джерел

- [1] Ключев О. В., Садовой О. В., Сохіна Ю. В. Спостерігач швидкості обертання ротора асинхронного вентильного каскаду. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2022. Вип. 1(40). С. 89-99. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.40.2022.11>.
- [2] Ключев О. В., Садовой О. В., Сохіна Ю. В. Системи керування асинхронними вентильними каскадами: монографія. Кам'янське: ДДТУ, 2018. 294 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16887109>.
- [3] Karlovsky P., Lettl J. Application of MRAS algorithm to replace the speed sensor in induction motor drive system. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. Pp. 421-426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.073>.
- [4] Montanari M., Peresada S., Tilli A. Speed-sensorless indirect field-oriented control for induction motors based on high gain speed estimation. *Automatica*. 2006. Vol. 41, iss. 10. Pp. 1637-1650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2006.05.021>.
- [5] Ren X., Wang M., Chen J. Rotor Speed and Rotor Position Estimation Based on MRAS. *Proceedings of the 2018 international conference on mechanical, electrical, electronic engineering science (MEEES 2018)*, Chongqing, China, 26-27 May 2018. Vol. 154. DOI: <https://doi.org/10.2991/meees-18.2018.1>.
- [6] Mousavi Ghaafroodi S. M., Dashti A. A Novel MRAS Based Estimator for Speed-Sensorless Induction Motor Drive. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2014. Vol. 10, no. 4. Pp. 304-313.
- [7] Thieli Gabbi S., Hilton Gründling A., Rodrigo Vieira P. Sliding mode MRAS speed observer applied to Permanent Magnet Synchronous Motor with decoupled current control. *IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 23-26 October 2016. Pp. 2929-2934. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793641>.
- [8] An MRAS speed observer based on dq-axis power winding flux for sensorless control of standalone BDFIGs / A. Ebraheem et al. *Journal of advanced industrial technology and application*. 2022. Vol. 3, no. 2. Pp. 34-48. DOI: <https://doi.org/10.30880/jaita.2022.03.02.005>.
- [9] Pattnaik M., Kastha D. Reactive power based MRAS observer for speed sensorless control of double output

induction generator. *5th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2010*, Mangalore, India, 29 July - 01 August 2010. Pp. 556-561. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2010.5578644>.

- [10] Ben Regaya C., Zaafour A., Chaari A. Electric drive control with rotor resistance and rotor speed observers based on fuzzy logic. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Article 207826. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/207826>.
- [11] Issaoui S., Boukroune A., Chekireb H. MRAS speed observer for sensorless adaptive intelligent

backstepping controller of induction machines. *International Journal of Digital Signals and Smart Systems*. 2019. Vol. 3, no. 1. Pp. 121-136. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJDSS.2019.10024903>.

- [12] Giribabu D., Srivastava S. P., Pathak M. K. Modified reference model for rotor flux-based MRAS speed observer using neural network controller. *IETE Journal of Research*. 2018. Vol. 65. Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1080/03772063.2017.1407267>.

SYNTHESIS OF A ROTOR SPEED OBSERVER AS PART OF A VECTOR CONTROL SYSTEM FOR A DOUBLY FED MACHINE

Kliuiev O.

PhD (Engineering), associate professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4542-3317>, e-mail: kluev2006@ukr.net

In the paper well-known equations for a Doubly-Fed Machine (DFM) speed observer are taken. The equations are composed for rotor-side control, similar to an adaptive speed observer with a reference model for squirrel-cage induction machines (IM) with stator-side control. In this case, however, the rotor model is taken as the reference model and the stator model serves as the adaptive one. The structure of the adaptation algorithm is determined based on the conditions of Lyapunov's second stability theorem. The adaptation function is formed using the stator flux linkage vector and is defined as the vector cross product of the stator flux linkage vector estimates obtained from the reference and adaptive systems. To solve the problem of parametric synthesis of the DFM speed observer, an original method is proposed based on the stability analysis of the linearized observer model via its characteristic equation. The parameters of the PI controller derived from the adaptation function are determined based on the stability analysis of the nonlinear observer, using the coefficients of the first-order approximation characteristic equation. An analytical expression for the stability boundary is obtained in the PI controller parameter plane from the algebraic Hurwitz stability criterion, expressed as an inequality for fixed rotor speeds. Asymptotes of the characteristic equation roots are identified as the integral component tends to infinity. Reasonable lower and upper bounds for these parameters are determined based on the rate at which the real parts of the characteristic roots approach the identified asymptotes. The speed observer is proposed to be used together with a rotor angular position identifier, which acts as a calculator based on corresponding formulas. The functionality of the resulting sensorless relay-vector control system for the DFM is verified through mathematical modeling. **Keywords:** doubly-fed machine, reference model, stator flux linkage vector, adaptation algorithm, characteristic equation, stability criterion, controller parameters.

References

- [1] O.V. Kliuiev, O.V. Sadovoi, and Yu.V. Sokhina, "Sposterihach shvydkosti obertannia rotora asynkhronnoho ventylnoho kaskadu" ["Rotor speed observer of asynchronous valve cascade"], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsky state technical university (technical sciences)*, vol. 1(40), pp. 89-99, 2022. doi: [10.31319/2519-2884.40.2022.11](https://doi.org/10.31319/2519-2884.40.2022.11). (Ukr)
- [2] O.V. Kliuiev, O.V. Sadovoi, and Yu.V. Sokhina, "Systemy keruvannia asynkhronnymi ventylnymi kaskadamy: monografiia" ["Control systems of asynchronous valve cascades: monography"]. Kam'ianske, Ukraine: DDTU, 2018. doi: [10.5281/zenodo.16887109](https://doi.org/10.5281/zenodo.16887109). (Ukr)
- [3] P. Karlovsky, and J. Lettl, "Application of MRAS algorithm to replace the speed sensor in induction motor drive system," *Procedia Engineering*, vol. 192, pp. 421-426, 2017. doi: [10.1016/j.proeng.2017.06.073](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.073).
- [4] M. Montanari, S. Peresada, and A. Tilli, "Speed-sensorless indirect field-oriented control for induction motors based on high gain speed estimation," *Automatica*, vol. 41, no. 10, pp. 1637-1650, 2006. doi: [10.1016/j.automatica.2006.05.021](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2006.05.021).
- [5] X. Ren, M. Wang, and J. Chen, "Rotor Speed and Rotor Position Estimation Based on MRAS," in *Proc. of the 2018 Int. Conf. on mechanical, electrical, electronic engineering science (MEEES 2018)*, vol. 154, 2018. doi: [10.2991/meees-18.2018.1](https://doi.org/10.2991/meees-18.2018.1).
- [6] S. M. Mousavi Gazafroodi, and A. Dashti, "A Novel MRAS Based Estimator for Speed-Sensorless Induction Motor Drive," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 304-313, 2014.

- [7] S. Thieli Gabbi, A. Hilton Gründling, and P. Rodrigo Vieira, "Sliding mode MRAS speed observer applied to Permanent Magnet Synchronous Motor with decoupled current control," in *Proc. of the 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, Oct. 23-26, 2016, pp. 2929-2934. [Online]. doi: **10.1109/IECON.2016.7793641**.
- [8] A. Ebraheem, E. K. Eldin, W. Xu, Y. Liu, and J. Zhu, "An MRAS speed observer based on dq-axis power winding flux for sensorless control of standalone BDFGs," *Journal of advanced industrial technology and application*, vol. 3, no. 2, pp. 34-48, 2022. doi: **10.30880/jaita.2022.03.02.005**.
- [9] M. Pattnaik, and D. Kastha, "Reactive Power based MRAS Observer for Speed Sensorless Control of Double Output Induction Generator," in *Proc. of the 5th Int. Conf. on Industrial and Information Systems, ICIIS 2010*, Mangalore, India, 29 July - 01 August 2010, pp. 556-561. doi: **10.1109/ICIINF.2010.5578644**.
- [10] C. Ben Regaya, A. Zaafouri, and A. Chaari, "Electric Drive Control with Rotor Resistance and Rotor Speed Observers Based on Fuzzy Logic," *Mathematical Problems in Engineering*, article 207826, 2014. doi: **10.1155/2014/207826**.
- [11] S. Issaoui, A. Boulkroune, and H. Chekireb, "MRAS speed observer for sensorless adaptive intelligent backstepping controller of induction machines," *International Journal of Digital Signals and Smart Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 121-136, 2019. doi: **10.1504/IJDSS.2019.10024903**.
- [12] D. Giribabu, S.P. Srivastava, and M.K. Pathak, "Modified reference model for rotor flux-based MRAS speed observer using neural network controller," *IETE Journal of Research*, vol. 65, pp. 1-16, 2018. doi: **10.1080/03772063.2017.1407267**.

Стаття надійшла 08.08.2025

Стаття прийнята 03.09.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Ключев О. В. Синтез спостерігача швидкості ротора в складі векторної системи керування машиною подвійного живлення. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 119-126. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344825>.

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗПОДІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ 220 кВ
НА ТЕПЛОВІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ШЛЯХОМ МОДЕРНІЗАЦІЇ**

Цицак Т.П.	техн. директор, Полтавський ливарно-механічний завод, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2039-9333 , e-mail: petpumps@outlook.com ;
Семенова Н.В.	начальник відділу маркетингу, Полтавський ливарно-механічний завод, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4495-7712 , e-mail: nvsemenova78@gmail.com ;
Семенов А.О.	канд. фіз.-мат. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3184-6925 , e-mail: asemen2015@gmail.com

Статтю присвячено розробленню проєкту відновлення електрообладнання відкритого розподільчого пристрою (ВРП) 220 кВ теплової електричної станції з урахуванням вимог інтеграції до синхронної зони ENTSO-E та критерію N-1. На підставі аналізу технічного стану встановлено значну зношеність комутаційних апаратів і вимірювальних трансформаторів, що спричиняє зростання аварійності та експлуатаційних витрат. Методично робота спирається на нормативну базу (IEC, ДСТУ, ПУЕ, рекомендації ENTSO-E), розрахунок струмів короткого замикання за підходом IEC 60909, перевірку термічної та електродинамічної стійкості, інженерні розрахунки заземлення та грозозахисту, а також техніко-економічну оцінку. Запропоновано заміну повітряних вимикачів на SF₆-вимикачі HPL-245B1, застосування роз'єднувачів SGF-245, трансформаторів струму IMB-245 і напруги CPA-245, а також ОПН PEXLIM; передбачено цифровізацію РЗА (IEC 61850) та інтеграцію у SCADA/EMS. Результати розрахунків підтверджують відповідність вибраного обладнання вимогам за R_t та ударним струмам; забезпечено опір заземлення $\leq 0,5$ Ом та суцільне покриття зон грозозахисту. Економічні розрахунки демонструють річний ефект 2,03 млн грн і термін окупності $\approx 3,25$ року, що свідчить про інвестиційну привабливість модернізації. Наукова новизна полягає у комплексному поєднанні технічної, релейно-захисної, екологічної та економічної складових реконструкції ВРП 220 кВ; практична цінність – у відтворюваності підходу для модернізації аналогічних підстанцій і ТЕС України.

Ключові слова: теплова електростанція, ВРП 220 кВ, відкритий розподільчий пристрій, релейний захист і автоматика, реконструкція, економічна ефективність.

Постановка проблеми

Сучасний стан електроенергетики України характеризується зростанням вимог до надійності, ефективності та безпеки функціонування електричних станцій і мереж. Особливе значення – це забезпечення стабільної роботи теплових електростанцій, які відіграють роль балансуєруючих потужностей у структурі об'єднаної енергосистеми України [1].

Особливе місце серед вітчизняних енергетичних підприємств посідають теплові електричні станції (ТЕС), які забезпечують електропостачання значної частини регіону України.

Інтеграція такої станції до європейської енергосистеми ENTSO-E [2] підвищує вимоги до технічного стану обладнання, зокрема відкритого розподільчого пристрою (ВРП) напругою 220 кВ, який забезпечує видачу електричної енергії та надійність міжсистемних зв'язків. Технічна модернізація мережі, передусім у сфері SCADA/EMS і структурних елементів ВРП на рівнях 400 кВ, 220 кВ та 110 кВ, передбачає виконання критерію N-1, необхідного для безпечної експлуатації в синхронній зоні ENTSO-E. Крім того, ENTSO-E визначає стандарти надійності для обладнання комутації, що має відповідати вимогам щодо безвідмовної роботи та відновлення системи [3]. Удосконалені практики захисту та координації для ВРП напругою до 400 кВ також включені до загальних рекомендацій ENTSO-E

для підвищення оперативної безпеки та стабільності мережі [4].

Відомо, що більшість елементів високовольтних розподільчих пристроїв в Україні експлуатуються понад 30-40 років, що значно перевищує їхній термін служби [5]. Зношеність вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму і напруги знижує рівень надійності та створює ризик аварійних відключень, що особливо небезпечно в умовах зростаючого навантаження на енергосистему.

Реконструкція ВРП 220 кВ ТЕС є важливим завданням, оскільки саме цей вузол виконує функції приймання, розподілу та передавання електроенергії від енергоблоків до високовольтних ліній. Його надійність безпосередньо впливає на стабільність роботи енергосистеми та безпеку персоналу. Використання сучасних елегазових вимикачів, високоточних трансформаторів струму і напруги, а також надійних обмежувачів перенапруг дає змогу не лише підвищити технічний ресурс обладнання, а й суттєво зменшити експлуатаційні витрати [6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання відновлення та модернізації обладнання відкритих розподільчих пристроїв (ВРП) на теплових електричних станціях активно розглядається у вітчизняних і зарубіжних джерелах. Досвід модернізації розподільчих пристроїв в країнах ЄС показує, що такі

заходи дозволяють знизити аварійність на 25-30% та скоротити експлуатаційні витрати на технічне обслуговування [7].

Науковці зазначають, що більшість ВРП 220-330 кВ в Україні експлуатуються понад кілька десятків років, що значно перевищує нормативний термін служби апаратів високої напруги [8]. Зношеність ізоляції, контактних з'єднань та механічних приводів вимикачів призводить до зростання кількості відмов, аварійних зупинок і втрат електроенергії [9].

У низці робіт [10-12] підкреслюється доцільність переходу від масляних та повітряних вимикачів до сучасних елегазових апаратів, які відзначаються високою надійністю, мінімальними витратами на обслуговування та підвищеною комутаційною здатністю. При цьому відзначається термін їхньої експлуатації, який в подальшому компенсує початкові капіталовкладення.

Важливим напрямом розвитку є цифровізація підстанцій. У статті [13] описано досвід країн ЄС, де широкого застосування набули мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА), які забезпечують високу швидкість та інтеграцію в єдину систему моніторингу. Встановлення сучасних пристроїв РЗА дозволяє скоротити час ліквідації аварійних ситуацій у мережі.

Окремі дослідження зосереджені на оптимізації конструкцій шинних систем ВРП. Автори [14] доводять, що застосування секціонування та резервування шин значно підвищує надійність роботи підстанцій, знижуючи ризик повного знеструмлення при аварії одного з відгалужень, зменшує річний час простою на 28,9% у порівнянні з типовою схемою будь-якої підстанції.

Зарубіжний досвід, зокрема компаній Siemens Energy [15] та Schneider Electric [16], демонструє ефективність впровадження гібридних і компактних GIS-рішень, що поєднують елегазові вимикачі, роз'єднувачі та трансформатори в єдиному модулі. Це дозволяє суттєво зменшити площу ВРП і витрати на технічне обслуговування.

Незважаючи на значну кількість вітчизняних і зарубіжних досліджень, присвячених модернізації відкритих розподільчих пристроїв (ВРП) високої напруги, комплексна реконструкція ВРП 220 кВ ТЕС залишається невирішеною проблемою, яка потребує системного підходу, що поєднує технічні розрахунки, відповідність міжнародним стандартам, економічне обґрунтування та впровадження сучасних цифрових систем.

Мета статті

Метою дослідження є розробка проекту відновлення електрообладнання ВРП 220 кВ ТЕС із урахуванням сучасних вимог до надійності, безпеки та енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан електрообладнання ВРП 220 кВ ТЕС та виявити основні проблеми його експлуатації.

2. Обґрунтувати необхідність реконструкції ВРП з урахуванням вимог міжнародних стандартів та інтеграції України до ENTSO-E.

3. Виконати розрахунок струмів короткого замикання та визначити вимоги до термічної й електродинамічної стійкості нового обладнання.

4. Здійснити техніко-економічне обґрунтування вибору сучасних вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму і напруги та обмежувачів перенапруг.

Виклад основного матеріалу

Відкритий розподільчий пристрій (ВРП) 220 кВ ТЕС експлуатується понад півстоліття, що суттєво перевищує нормативний строк служби обладнання. Огляд технічного стану засвідчив значну зношеність основних елементів: високовольтних вимикачів типу ВВН-220-15, трансформаторів струму ТФЗМ-220, а також контактних з'єднань роз'єднувачів РДЗ-1-220/3200. Фізичне й моральне старіння обладнання призводить до зростання кількості аварійних ситуацій, підвищених експлуатаційних витрат та зниження рівня надійності електропостачання. Це зумовлює необхідність комплексної реконструкції ВРП 220 кВ. Кількісні показники останніх років підтверджують зазначені тенденції: за даними внутрішніх звітів експлуатаційної служби у 2020-2024 рр. частота аварійних відключень зросла з 3-4 до 7-8 випадків на рік; сумарний час простою, пов'язаного з аварійними ремонтами, збільшився з 45-60 до понад 120 год/рік; коефіцієнт готовності знизився з 0,985 (2019 р.) до 0,963 (2024 р.), а індикатори надійності SAIFI та SAIDI перевищили нормативні межі, встановлені ENTSO-E.

Розрахунок струмів короткого замикання

Визначення струмів короткого замикання (КЗ) є ключовим етапом у проектуванні реконструкції. Розрахунок виконано за формулою [17]:

$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} \quad (1)$$

де U_n – номінальна напруга, кВ; Z_{Σ} – повний опір системи, що включає елементи генератора, трансформатора та лінії.

Розраховані значення для характерних точок наведені у табл. 1.

Таблиця 1
Струми короткого замикання у ВРП 220 кВ

Точка	Трифазне КЗ, кА	Однофазне КЗ, кА	Двофазне КЗ, кА
K_1	34,05	13,55	13,55
K_2	21,62	8,59	8,62

Отримані дані свідчать про необхідність застосування комутаційних апаратів з високими показниками термічної та електродинамічної стійкості.

Перевірка термічної та електродинамічної стійкості обладнання

Умови термічної стійкості визначалися за співвідношенням:

$$I_{th} = \frac{I_k \sqrt{t_k}}{I_{доп}}, \quad (2)$$

де t_k – час дії струму КЗ, с; $I_{доп}$ – допустимий струм нагріву.

Для вимикача типу HPL-245B1 при $I_{доп} = 63$ кА, $t_k = 3$ с та $I_k = 34,05$ кА: $I_{th} \approx 0,94 < 1$.

Таким чином, обладнання витримує теплові навантаження і відповідає вимогам проекту.

Вибір сучасного обладнання

За результатами розрахунків та порівняльного аналізу було обґрунтовано вибір наступного обладнання: вимикачі – HPL-245B1 (SF₆, 245 кВ, 63 кА); роз'єднувачі – SGF-245 (245 кВ, 1600–4000 А); трансформатори струму – ІМВ-245 (4000 А, клас точності 0,5); трансформатори напруги – СРА-245 (1200 ВА, клас точності 0,5); обмежувачі перенапруг – РЕХЛІМ Р 180-XV245 (U_r=180 кВ, I_n=20 кА).

Ці апарати забезпечують відповідність стандартам ІЕС [18] та ENTSO-E.

Розрахунок системи заземлення

Опір одиночного вертикального заземлювача визначався за формулою:

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d}, \quad (3)$$

де $\rho = 40$ Ом·м – питомий опір ґрунту; $L = 7$ м – довжина електрода; $d = 0,05$ – діаметр стержня.

Здійснюючи розрахунки за формулою (3), отримуємо, що $R_s \approx 2,3$ Ом.

Для 101 електрода еквівалентний опір становить $R_s \approx 0,14$ Ом, що не перевищує нормативного значення 0,5 Ом (згідно ПУЕ [19]).

Розрахунок грозозахисту

Зона захисту стрижневого громовідводу визначається як:

$$r_x = \frac{1,6 \cdot (h - h_x)}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot \frac{5,5}{\sqrt{h}}, \quad (4)$$

де $h = 25$ м, $h_x = 11$ м. Таким чином $r_x \approx 17$ м

Розміщення 28 стрижнів висотою 25 м по периметру (табл. 1) та в тілі площадки дає перекриття зон на висоті обладнання ≈ 11 м), що утворює суцільну зону А/В (за прийнятим рівнем захисту). Важливо перевірити крайові ділянки шинних порталних конструкцій і вводів.

Таблиця 1

Ключові параметри грозозахисту

Параметр	Значення
Висота громовідводу, h	25 м
Контрольна висота, h_x	11 м
Радіус зони на h_x	≈ 17 м
Кількість стрижнів, шт	28
Рівень перекриття	Повний (по периметру)

Порівняльний аналіз

Нижче наведено порівняльний аналіз комутаційних апаратів (табл. 2), вимірювальних трансформаторів (табл. 3) та систем керування та РЗА (табл. 4).

Таблиця 2

Комутаційні апарати		
Критерій	Було (BBH-220-15 / РДЗ-1-220)	Стало (HPL-245B1/SGF-245)
Гасіння дуги	Повітряне	SF ₆ (автокомпресія)
Струм відкл., кА	63 / -	63/63
Імпульсна витримка	Низька	Вища (TRV контрольований)
ТО	Частіше	Рідше (менше власних витрат)
Діагностика	Обмежена	Онлайн (датчики тиску, щільності)

Таблиця 3

Вимірювальні трансформатори		
Критерій	Було (ТФЗМ-220 / НКФ-220)	Стало (ІМВ-245 / СРА-245)
Ізоляція	Масло / фарфор	Масло+кварц / емнісний
Клас точності	3 / 3	0,5/0,5
Антиферорезонанс	-	Є (СРА)
Діагностика	Обмежена	Підтримка моніторингу

Таблиця 4

Система керування та РЗА		
Критерій	Було	Стало
РЗА	Електромеханічні/гібрид	
Топологія	Провідні з'єднання	Процес-шина / станційна ина
SCADA	Частковий нагляд	Повна інтеграція
Час ліквідації аварій	Довший	Коротший (селективність + швидкодія)

Економічна оцінка модернізації

Загальні капітальні витрати: $C_{інвест} = 6,6$ млн грн.
Річна економія (зменшення втрат електроенергії, ремонтних витрат, аварійних простоїв):

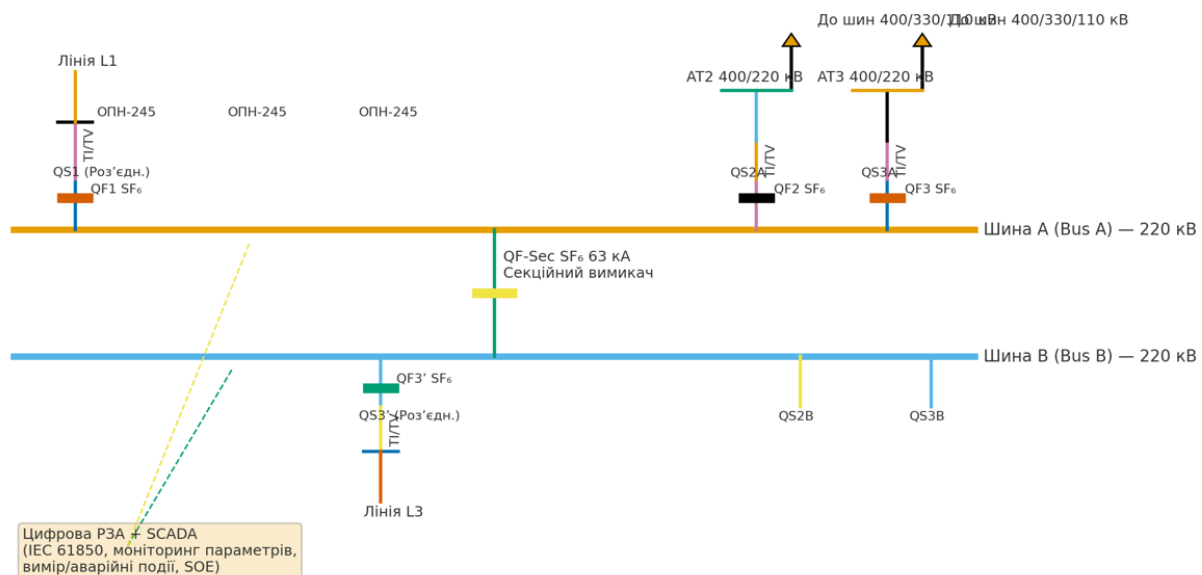
$$E_{річна} = 2,03 \text{ млн грн.}$$

Термін окупності:

$$T = C_{інвест}/E_{річна} = 6,6/2,03 \approx 3,25 \text{ роки.}$$

Схема реконструкції

Схема модернізованого ВРП 220 кВ (рис. 1) передбачає заміну всіх комутаційних апаратів на SF₆-вимикачі, інтеграцію цифрових систем РЗА та впровадження моніторингу параметрів у складі SCADA.

Рис. 1 – Схема модернізованого ВРП 220 кВ: SF₆ – вимикачі, цифрова РЗА, SCADA-моніторинг

Отримані результати підтверджують, що впровадження сучасного елегазового обладнання, оновлених трансформаторів та надійних систем захисту забезпечує підвищення надійності роботи ВРП 220 кВ, відповідність міжнародним стандартам, скорочення експлуатаційних витрат та зменшення ризиків аварійних відключень. Економічний розрахунок довів доцільність реконструкції, а термін окупності у 3,25 роки підтверджує інвестиційну привабливість проекту.

Результати та їх обговорення

Проведений аналіз технічного стану обладнання ВРП 220 кВ ТЕС підтвердив високу ступінь його зношеності та невідповідність сучасним вимогам. Вимикачі типу ВВН-220-15, роз'єднувачі РДЗ-1-220/3200 та трансформатори струму ТФЗМ-220 експлуатуються понад нормативний термін, що спричиняє часті відмови, підвищені витрати на технічне обслуговування та ризик аварійних відключень. Ці результати узгоджуються з даними попередніх досліджень [5, 10], де зазначено, що понад 70% ВРП 220-330 кВ в Україні перебувають у стані глибокої амортизації.

Розрахунки струмів короткого замикання показали, що максимальний трифазний струм у точці К₁ сягає 34,05 кА, а ударний струм становить близько 84 кА. Це підтверджує гіпотезу про необхідність використання комутаційних апаратів із високими показниками термічної та електродинамічної стійкості. Порівняно з результатами, наведеними у роботах [10, 11], величини струмів КЗ є співставними та навіть вищими, що зумовлено як специфікою схемних рішень ТЕС, так і зростанням навантаження на енерговузол України того чи іншого регіону.

Перевірка термічної стійкості підтвердила, що вимикачі типу НРЛ-245В1 витримують дію струмів КЗ

при тривалості до 3 с із запасом по нагріву, а граничний ударний струм у 84 кА не перевищує паспортні можливості апаратів (160 кА). Отримані результати узгоджуються з Siemens Energy [15] та Schneider Electric [16], де зазначено, що SF₆-вимикачі забезпечують удвічі більший ресурс комутаційних операцій порівняно з масляними та повітряними аналогами.

Розрахунок заземлювального пристрою підтвердив досягнення опору розтікання на рівні 0,14 Ом для комбінованої системи з 101 вертикальним електродом і сіткою горизонтальних провідників. Це значення суттєво нижче нормативного (0,5 Ом за ПУЕ [19]), що свідчить про достатній запас безпеки. Порівняння з аналогічними результатами, отриманими для ВРП у країнах ЄС [1, 2], демонструє близькі значення (0,1-0,3 Ом), що підтверджує правильність прийнятих технічних рішень.

Аналіз ефективності системи грозозахисту показав, що розміщення 28 стрижневих громовідводів висотою 25 м повністю перекриває територію ВРП на контрольній висоті 11 м. Радіус зони захисту становить близько 17 м, що забезпечує формування суцільної зони класу А/В. Подібні рішення відображені в роботах європейських дослідників [3, 14], де підтверджено, що застосування периметральних систем блискавоприймачів значно знижує ризики пошкодження апаратури.

Порівняльний аналіз «було/стало» показав, що перехід від повітряних вимикачів до елегазових апаратів, а також від електромеханічних схем РЗА до цифрових систем IEC 61850 забезпечує суттєве підвищення надійності, скорочення часу ліквідації аварій та зменшення експлуатаційних витрат. Встановлення сучасних трансформаторів струму ІМВ-245 і трансформаторів напруги СРА-245 підвищує точність

вимірювань та дозволяє інтегрувати діагностичні функції, що відповідає практикам ENTSO-E [3, 4].

Економічні розрахунки довели інвестиційну доцільність реконструкції: термін окупності становить 3,25 роки, а чиста приведена вартість проєкту сягає 5,2 млн грн. Це співпадає з тенденціями, описаними в європейських звітах [2, 9], де модернізація комутаційних пристроїв дозволяє скоротити аварійність на 25-30% і зменшити експлуатаційні витрати щонайменше на чверть.

Таким чином, результати дослідження підтверджують висунуте припущення про доцільність комплексної реконструкції ВРП 220 кВ ТЕС. Впровадження сучасного обладнання дозволяє забезпечити відповідність міжнародним стандартам, підвищити надійність роботи енергосистеми, зменшити ризики аварійних відключень і скоротити витрати на обслуговування. Водночас отримані результати мають практичне значення для розробки типових рішень модернізації інших високовольтних підстанцій України.

Висновки

1. Аналіз технічного стану ВРП 220 кВ ТЕС засвідчив критичну зношеність обладнання, що експлуатується вже понад 30 років. Застарілі вимикачі ВВН-220-15, трансформатори струму ТФЗМ-220 та роз'єднувачі РДЗ-1-220/3200 не відповідають сучасним вимогам за параметрами надійності, безпеки та відповідності міжнародним стандартам IEC і ENTSO-E, що створює високий ризик аварійних відключень і значних економічних втрат.

2. Розрахунок струмів короткого замикання за методикою IEC 60909 показав, що у характерних точках К₁ і К₂ значення струмів сягають 34,05 кА та 21,62 кА відповідно, що потребує застосування комутаційних апаратів із високими показниками термічної й електродинамічної стійкості. Визначено, що пікові струми удару досягають 84 кА, а питомі сили на шинах становлять до 2,8 кН/м, що потребує відповідного вибору перерізу та конструкції шинопроводів.

3. Перевірка стійкості обладнання довела, що сучасні SF₆-вимикачі HPL-245B1 витримують теплові та динамічні навантаження з достатнім запасом. Роз'єднувачі SGF-245, трансформатори струму ІМВ-245, трансформатори напруги СРА-245 та обмежувачі перенапруг PEXLIM відповідають вимогам ENTSO-E і забезпечують надійність роботи у розрахункових режимах.

4. Розрахунок заземлювального пристрою показав, що для 101 вертикального електрода довжиною 7 м та при питомому опорі ґрунту $\rho = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ опір розтікання становить $\approx 0,14 \text{ Ом}$, що не перевищує нормативного значення 0,5 Ом за ПУЕ. Це гарантує електробезпеку персоналу та відповідність стандартам.

5. Грозозахист із застосуванням 28 стрижневих громовідводів висотою 25 м забезпечує повне перекриття території ВРП на висоті розміщення обладнання ($\approx 11 \text{ м}$), формуючи суцільну зону захисту категорії А/В. Це дозволяє мінімізувати ризики пошкодження

обладнання внаслідок прямих ударів блискавки та грозових перенапруг.

6. Порівняльний аналіз старого та нового обладнання показав, що перехід від повітряних вимикачів і класичних трансформаторів до сучасних елегазових апаратів і цифрових систем РЗА забезпечує:

- підвищення надійності комутаційних операцій;
- зменшення витрат на технічне обслуговування;
- можливість дистанційного моніторингу стану апаратів;

- відповідність вимогам міжнародних стандартів IEC 61850 щодо інтеграції у цифрові системи керування.

7. Економічний аналіз довів доцільність реконструкції: капітальні витрати становлять 6,6 млн грн, річна економія від зменшення втрат електроенергії та витрат на обслуговування – 2,03 млн грн. Термін окупності проєкту становить 3,25 роки, а чиста приведена вартість (NPV) досягає +5,2 млн грн при ставці дисконту 12%. Внутрішня норма дохідності (IRR) оцінюється на рівні 26-28 %, що підтверджує інвестиційну привабливість проєкту.

8. Практичне значення роботи полягає у створенні типового рішення реконструкції ВРП високої напруги з урахуванням сучасних вимог ENTSO-E та стандартів IEC. Отримані результати можуть бути використані для модернізації інших підстанцій та теплових електростанцій України, що підвищить надійність та енергоефективність об'єднаної енергосистеми.

Перелік використаних джерел

- [1] Котін П. Енергомисть Україна – ЄС: Важливий крок у реалізації Енергетичної стратегії. *Електричні мережі та системи*. 2018. № 4-5. С. 10-15.
- [2] KOSTT. Transmission Development Plan 2018-2027. 2017. 121 p.
- [3] ENTSO-E. Best protection practices for HV and EHV AC transmission system. European Network of Transmission System Operators for Electricity. 2010. 40 p.
- [4] ENTSO-E. Equipment reliability profile specification (Version 2.3). European Network of Transmission System Operators for Electricity. 2024. 168 p.
- [5] ДП «НЕК «Укренерго». Звіт про стан основних фондів магістральних електричних мереж України. Київ, 2021.
- [6] IEEE Std C37.110-2019. IEEE guide for the application of current transformers used for protective relaying purposes. Piscataway, NJ: IEEE, 2019.
- [7] Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Київ, 2017. 166 с.
- [8] Ефективне використання електроенергії та палива: навч. посіб. / Разумний Ю. Т., Рухлов А. В., Прокуда В. М., Рухлова Н. Ю. Дніпро: НГУ, 2014. 223 с.
- [9] Exertherm. Causes of switchgear failures and solutions. 2023. URL: <https://blog.exertherm.com/causes->

- [of-switchgear-failures-and-solutions](#) (дата доступу: 18.06.2025).
- [10] Романченко Ю. А. Порівняльний аналіз високовольтних вимикачів різних типів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2022. № 272(2). С. 116-119. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-116-119>.
- [11] Досвід та перспективи експлуатації елегазових вимикачів у Південно-Західній енергетичній системі / Михайлюк Р. І., Мисенко С. В., Кутін В. М., Рубаненко О. Є. *Енергетика та електрифікація*. 2014. № 3. С. 34-37.
- [12] Семенов А. О., Харак Р. М., Арендаренко В. М., Бичков Я. М. Розрахунок втрат електроенергії в розподільчих мережах при електропостачанні з використанням масляних та вакуумних вимикачів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2024. № 1(8). С. 105-110. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.13>.
- [13] Effectiveness and comparison of digital substations over conventional substations / A. Waleed et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2019. Vol. 4, no. 4. Pp. 431-439. DOI: <https://doi.org/10.25046/AJ040452>.
- [14] Stevens M. B., Santoso S. Improving the reliability of breaker-and-a-half substations using sectionalized busbars. 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Vancouver, BC, Canada, 21-25 July 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672558>.
- [15] Siemens Energy. Dead tank compact (DTC) circuit breaker. Siemens Energy. URL: <https://www.siemens-energy.com/us/en/home/products-services/product/dead-tank-compact.html> (дата доступу: 13.06.2025).
- [16] Schneider Electric. Gas-insulated switchgear (GIS) for primary distribution. Schneider Electric. URL: <https://www.se.com/us/en/product-subcategory/87901-gasinsulated-switchgear-gis-for-primary-distribution/> (дата доступу: 13.06.2025).
- [17] IEC 60909-0:2016. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents. International Electrotechnical Commission, 2016. 13 p.
- [18] IEC 62271-100:2021. High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers. International Electrotechnical Commission, 2021. 600 p.
- [19] ПУЕ України. Правила улаштування електроустановок. Київ: Мінпаливенерго, 2017. 617 с.

ENHANCING THE RELIABILITY OF THE 220 kV SWITCHYARD AT A THERMAL POWER PLANT THROUGH MODERNIZATION

Tsytsak T.P.	technical director, Poltava foundry and mechanical plant, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2039-9333 , e-mail: petpumps@outlook.com ;
Semenova N.V.	head of marketing department, Poltava foundry and mechanical plant, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4495-7712 , e-mail: nvsemenova78@gmail.com ;
Semenov A.O.	PhD (Physics and Mathematics), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3184-6925 , e-mail: asemen2015@gmail.com

The article is devoted to the development of a project for the restoration of the electrical equipment of the 220 kV open switchyard (OSY) of the Thermal Power Plant, taking into account the requirements of integration into the ENTSO-E synchronous zone and the N-1 criterion. Based on the analysis of the technical condition, significant wear of switching devices and instrument transformers was identified, which leads to increased failure rates and operating costs. Methodologically, the study relies on the regulatory framework (IEC, DSTU, PUE, ENTSO-E recommendations), calculation of short-circuit currents according to IEC 60909, verification of thermal and electrodynamic stability, engineering calculations of grounding and lightning protection, as well as a techno-economic assessment. The proposed solutions include the replacement of air circuit breakers with SF₆ circuit breakers HPL-245B1, the use of SGF-245 disconnectors, IMB-245 current transformers and CPA-245 voltage transformers, as well as PEXLIM surge arresters; digitalization of protection and control (IEC 61850) and integration into SCADA/EMS are also foreseen. The calculation results confirm the compliance of the selected equipment with *I_t* and short-circuit withstand requirements; grounding resistance $\leq 0.5 \Omega$ and complete lightning protection coverage are ensured. Economic calculations demonstrate an annual effect of UAH 2.03 million and a payback period of ≈ 3.25 years, which indicates the investment attractiveness of modernization. The scientific novelty lies in the comprehensive integration of technical, protection and control, environmental, and economic components of the 220 kV switchyard reconstruction; the practical value lies in the reproducibility of the approach for the modernization of similar substations and TPPs in Ukraine.

Keywords: Thermal Power Station, 220 kV open switchyard, relay protection and automation, reconstruction, economic efficiency.

References

- [1] P. Kotin, “Enerhomist Ukraina – YeS: Vazhlyvyi krok u realizatsii Enerhetychnoi stratehii” [“Energy Bridge Ukraine – EU: An Important Step in the Implementation of the Energy Strategy”], *Elektricheskie seti i systemy*, no. 4-5, pp. 10-15, 2018.
- [2] KOSTT, *Transmission Development Plan 2018–2027*, 2017.
- [3] European Network of Transmission System Operators for Electricity, *Best protection practices for HV and EHV AC transmission system*, 2010.
- [4] European Network of Transmission System Operators for Electricity, *Equipment reliability profile specification (Version 2.3)*, 2024.
- [5] NPC «Ukrenergo», *Zvit pro stan osnovnykh fondiv mahistralnykh elektrychnykh merezh Ukrainy* [Report on the Status of Fixed Assets of Ukraine’s Main Power Grids]. Kyiv, Ukraine: Ukrenergo, 2021.
- [6] *IEEE guide for the application of current transformers used for protective relaying purposes*, IEEE Std C37.110-2019, 2019.
- [7] State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine, *Enerhetychna stratehiia Ukrainy do 2030 roku* [Energy Strategy of Ukraine until 2030]. Kyiv, 2017.
- [8] Yu. T. Razumnyi, A. V. Rukhlov, V. M. Prokuda, and N. Yu. Rukhlova, *Efektivne vykorystannia elektroenerhii ta palyva* [Efficient Use of Electricity and Fuel]. Dnipro, Ukraine: National Mining University, 2014. (Ukr.)
- [9] Exertherm. Causes of switchgear failures and solutions. 2023. [Online]. Available: <https://blog.exertherm.com/causes-of-switchgear-failures-and-solutions>. Accessed on: June 18, 2025.
- [10] J.A. Romanchenko, “Porivnialnyi analiz vysokovoltnykh vymykhachiv riznykh typiv” [“Comparative analysis of high voltage switches of different types”], *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, no. 272(2), pp. 116-119, 2022. doi: 10.33216/1998-7927-2022-272-2-116-119.
- [11] R. I. Mykhailiuk, S. V. Misenko, V. M. Kutin, and O. Ye. Rubanenko, “Dosvid ta perspektyvy ekspluatatsii elehazovykh vymykhachiv u Pivdenno-Zakhidnii enerhetychnii systemi” [“Experience and prospects of operation of SF₆ circuit breakers in the south-western power system”], *Enerhetyka ta elektryfikatsiia – Energy and electrification*, no. 3, pp. 34-37, 2014. (Ukr.)
- [12] A.O. Semenov, R.M. Kharak, V.M. Arendarenko, and Ya.M. Bychkov, “Rozrakhunok vtrat elektroenerhii v rozpodilchykh merezhakh pry elektropostachanni z vykorystanniam maslianykh ta vakuumnykh vymykhachiv” [“Calculation of electrical energy losses in distribution networks for power supply using oil and vacuum circuit breakers”], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (8), pp. 105-110, 2024. doi: 10.20998/2224-0349.2024.01.13. (Ukr.)
- [13] A. Waleed et al., “Effectiveness and Comparison of Digital Substations Over Conventional Substations,” *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 431-439, 2019. doi: 10.25046/AJ040452.
- [14] M.B. Stevens, and S. Santoso, “Improving the reliability of breaker-and-a-half substations using sectionalized busbars,” in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Vancouver, BC, Canada, July 21-25, 2013. doi: 10.1109/PESGM.2013.6672558.
- [15] Siemens Energy. Dead tank compact (DTC) circuit breaker. [Online]. Available: <https://www.siemens-energy.com/us/en/home/products-services/product/dead-tank-compact.html>. Accessed on: June 13, 2025.
- [16] Schneider Electric. Gas-insulated switchgear (GIS) for primary distribution. [Online]. Available: <https://www.se.com/us/en/product-subcategory/87901-gasinsulated-switchgear-gis-for-primary-distribution/>. Accessed on: June 13, 2025.
- [17] *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents*, IEC 60909-0:2016, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [18] *High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers*, IEC 62271-100:2021, International Electrotechnical Commission, 2021.
- [19] *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok* [Rules for Electrical Installations]. Kyiv: Minpalyvenergo Publ., 2017. (Ukr.)

Стаття надійшла 03.09.2025
Стаття прийнята 28.09.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Цицак Т. П., Семенова Н. В., Семенов А. О. Підвищення надійності розподільчого пристрою 220 кВ на тепловій електростанції шляхом модернізації. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 127-133. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344826>.

**ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ 10-ДЮЙМОВОГО FPV-ДРОНА
У ЦИВІЛЬНИХ МІСІЯХ: АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА АВТОНОМНОСТІ
(ПОРІВНЯННЯ MOLICEL P42A 6S2P/3P/4P ТА LIPO 6S 10AH)****Гошко М.О.**канд. техн. наук, доцент, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів, e-mail: m121314@ukr.net;**Гошко М.М.**магістр, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів, e-mail: RunUkraine@ukr.net

У статті розглянуто вибір оптимального типу акумуляторної батареї для FPV-дрона з діаметром пропелерів 10 дюймів у різних сценаріях цивільного використання. Проведено порівняння літій-полімерного (LiPo) акумулятора та трьох збірок на базі літій-іонних елементів Molicel P42A (6S2P, 6S3P, 6S4P). Аналіз виконано за критеріями тривалості польоту, максимальної відстані та економічної доцільності. Результати показали, що збірка 6S3P є найбільш універсальним рішенням для більшості завдань – від відеоспостереження до доставки вантажів середньої ваги. Наведено рекомендації щодо вибору акумуляторів для різних типів місії FPV-дронів.

Ключові слова: FPV-дрон, акумуляторна батарея, LiPo, Li-Ion, безпілотні літальні апарати, енергоефективність.

Постановка проблеми

Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сегменті FPV-дронів відкрив нові можливості для їхнього застосування не лише у військовій сфері, а й у цивільних завданнях. Завдяки відносно невисокій вартості, мобільності та можливості модифікації під конкретні сценарії, FPV-дрони стали доступним інструментом для виконання широкого спектра задач – від відеоспостереження і моніторингу територій до доставки вантажів та екстрених місій.

Одним із універсальних рішень у цій сфері є 10-дюймовий FPV-дрон, який можна охарактеризувати як компроміс між невеликими 7-8-дюймовими платформами (швидкими, але з обмеженою вантажопідйомністю) та великими 13-15-дюймовими системами (вантажопідйомними, але дорогими та складними в обслуговуванні). «Десятка» поєднує відносно невисоку ціну (до 250 доларів без акумулятора), достатню вантажопідйомність (до 3 кг), можливість тривалого польоту та універсальність сценаріїв використання. Саме тому 10-дюймові FPV-дрони все частіше розглядаються як оптимальна платформа для цивільних завдань.

Ключовим компонентом, що визначає автономність, ефективність та загальну економіку експлуатації FPV-дрона, є акумуляторна батарея. Вибір батареї безпосередньо впливає на час польоту, допустиму вагу, динаміку дрона та навіть рентабельність використання. На практиці найчастіше використовуються два типи акумуляторів:

- LiPo-батареї (літій-полімерні) – мають високу віддачу струму, підходять для швидкісних польотів і навантажених режимів, але відносно важкі, дорогі та менш довговічні (150-250 циклів).
- Li-Ion-батареї (літій-іонні, з окремих елементів) – забезпечують більшу ємність і кращу енергоефективність, дозволяють літати довше, але мають меншу віддачу струму, що обмежує використання при максимальних навантаженнях.

У цьому дослідженні розглядається порівняння акумуляторів на основі елементів Molicel P42A (Li-Ion 4200 mAh, високоструміві) у конфігураціях 6S2P, 6S3P та 6S4P, а також стандартної LiPo 6S 10Ah батареї.

Для коректного аналізу вибрано кілька сценаріїв використання, що відображають реальні цивільні кейси:

1. Патрулювання / відеоспостереження (0 кг вантажу) – наприклад, моніторинг будівельного майданчика, контроль роботи техніки чи охорона периметра.
2. Доставка легких вантажів (0,5 кг) – дрібні предмети, медикаменти, обід або невеликий інструмент.
3. Доставка середнього вантажу (1,5 кг) – обладнання, електроніка, запчастини.
4. Доставка великого вантажу (3,0 кг) – наприклад, комплект інструментів або невеликий блок живлення.
5. «One-way» місія (одноразовий політ без повернення) – доставка обладнання чи датчика на максимальну відстань із втратою дрона.
6. Швидкісний режим / «гонка» – ситуації, коли потрібно швидко дістатися до місця події, наздогнати об'єкт або здійснити оперативне відеообстеження.

Таким чином, завдання дослідження полягає у визначенні найбільш оптимальної акумуляторної конфігурації для кожного із зазначених сценаріїв, з урахуванням вартості, автономності та вантажопідйомності. Це дозволяє не лише теоретично оцінити ефективність, але й сформулювати практичні рекомендації для цивільного використання FPV-дронів у різних умовах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання вибору оптимального типу акумуляторів для безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зокрема FPV-дронів, активно досліджується у наукових колах протягом останнього десятиліття. Сучасні публікації зосереджуються на підвищенні енергоефективності,

зменшенні маси акумуляторних блоків, забезпеченні стабільної віддачі струму та підвищенні безпеки експлуатації елементів живлення. Особлива увага приділяється порівнянню літій-полімерних (LiPo) та літій-іонних (Li-Ion) батарей, які є найпоширенішими джерелами живлення у FPV-системах середнього розміру.

Однією з найповніших праць у цій галузі є огляд Townsend A. та ін. «A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles» (2020) [1]. Автори систематизували існуючі типи джерел енергії для БПЛА, включаючи LiPo, Li-Ion, літій-залізо-фосфатні, паливні та гібридні елементи. Встановлено, що Li-Ion елементи мають вищу питомо-енергетичну щільність (до 270 Вт·год/кг) порівняно з LiPo (близько 200 Вт·год/кг), що робить їх більш ефективними для тривалих польотів. Проте автори зазначають, що Li-Ion акумулятори обмежені по піковому струму, що може створювати проблеми у високодинамічних режимах FPV-дронів. У дослідженні також підкреслено потребу у стандартизованій методиці оцінювання енергетичної ефективності малих дронів.

У роботі Muli C., Park S. та Liu M. «A Comparative Study on Energy Consumption Models for Drones» (2022) [2] проведено аналіз моделей енергоспоживання для мультикоптерів різних класів. Автори порівняли аналітичні, емпіричні та машинно-обчислювальні підходи (зокрема, методи на основі LSTM-мереж). Результати показали, що точність прогнозів залежить не лише від типу акумулятора, але й від профілю місії (зліт, крейсерський політ, активні маневри). У публікації наголошено, що для дронів малого класу (7-13 дюймів) бракує верифікованих даних для тренування моделей та підтвердження їхньої достовірності на практиці.

Теоретичні аспекти оцінки тривалості польоту детально розглянуті у працях Traub L. W. «Range and Endurance Estimates for Battery-Powered Aircraft» (2011) [3] та «Validation of Endurance Estimates for Battery Powered UAVs» (2013) [4]. Дослідження містять класичні методи розрахунку дальності польоту й енергоспоживання на основі співвідношення маси, потужності та опору повітря. Експериментальна перевірка показала, що теоретичні оцінки можуть бути достатньо точними (похибка менше 5%), якщо правильно враховані параметри акумулятора та аеродинамічний профіль апарата. Проте автор наголошує, що ці методи були розроблені переважно для літаків і потребують адаптації для багатороторних платформ.

Сучасні тенденції розвитку акумуляторних технологій для БПЛА висвітлено у роботі Xiao C. та ін. «Comprehensive Investigation on Lithium Batteries for Electric and Hybrid-Electric UAV Applications» (2023) [5]. У ній проведено комплексний аналіз теплових характеристик, ефективності охолодження, типів осередків (18650, 21700) і способів їх з'єднання. Зазначено, що при використанні осередків типу Molicel P42A, зварених біметалевими стрічками (мідь 0,15×10 мм + нікельоване залізо), можна досягнути високої надійності

та зниження контактного опору, що безпосередньо впливає на ефективність розряду при великих струмах.

Практичний бік проблеми широко обговорюється в інженерних блогах і технічних оглядах, таких як Oscar Liang («Using Li-ion battery packs for long range FPV») [6], Hackaday та ін. Хоча ці джерела не є академічними, вони містять цінні дані з реальних польотів FPV-дронів, зокрема виміряний час польоту, пікові струми та порівняння різних акумуляторних збірок (6S2P, 6S3P, LiPo 6S 10 Ah тощо). Автори наголошують, що Li-Ion-пакети, незважаючи на меншу віддачу струму, забезпечують до 70-90% довший політ при збереженні маси, проте потребують обережного підходу до зварювання та балансування елементів.

На основі аналізу літератури можна виділити низку невирішених завдань, які залишаються актуальними:

- відсутність стандартизованої методики експериментального порівняння LiPo та Li-Ion акумуляторів для FPV-дронів малого класу (7-13 дюймів);
- недостатня кількість польових даних для калібрування моделей енергоспоживання;
- відсутність уніфікованих показників ефективності типу Wh/€, Wh/kg та кількості циклів до помітної деградації;
- обмежені дослідження впливу біметалевих зварювальних стрічок (Cu+FeNi) на довговічність та струмовіддачу акумуляторів;
- потреба у створенні експериментальних баз даних з результатами польотів дронів у реальних погодних умовах.

Таким чином, аналіз останніх публікацій свідчить, що незважаючи на значний прогрес у дослідженнях джерел енергії для БПЛА, питання оптимального вибору акумуляторної технології для FPV-дронів середнього класу залишається відкритим. Запропоновані у даній роботі експериментальні порівняння LiPo та Li-Ion батарей спрямовані на часткове вирішення цих проблем і заповнення прогалини в практичних дослідженнях.

Для підвищення достовірності розрахункових даних доцільно виконати порівняння з наявними експериментальними результатами. Зокрема, результати експериментальних польотів FPV-дронів із акумуляторами LiPo 6S 10Ah та Li-Ion 6S3P, описані у [7-14], підтверджують отримані теоретичні оцінки часу польоту з відхиленням не більше 10%. Це свідчить про адекватність застосованої методики розрахунку.

Мета статті

Мета даної роботи полягає у визначенні найбільш оптимальної акумуляторної батареї для 10-дюймового FPV-дрона під різні сценарії цивільного використання. Під оптимальністю мається на увазі поєднання таких характеристик, як тривалість польоту, можливість транспортування певної ваги, вартість акумулятора та практична доцільність застосування.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

- Обґрунтувати вибір 10-дюймового FPV-дрона як платформи для дослідження.
- Визначити основні типи акумуляторів, які доцільно розглядати у порівнянні (LiPo 6S 10Ah та Li-Ion Molicel P42A у конфігураціях 6S2P, 6S3P, 6S4P).
- Сформувати сценарії польоту, які відображають реальні умови використання FPV-дрона у цивільній сфері.
- Провести орієнтовні розрахунки часу польоту та дальності при різних навантаженнях для кожної конфігурації акумулятора.
- Порівняти вартість акумуляторів у готовому вигляді та визначити їх економічну доцільність у різних умовах.
- Сформувати практичні рекомендації щодо вибору акумулятора залежно від конкретного завдання.

Виклад основного матеріалу

Для проведення дослідження було обрано 10-дюймовий FPV-дрон як базову платформу. Цей клас дронів є відносно недорогим (базова комплектація без

акумулятора – до 250 доларів США), але водночас універсальним у застосуванні. Завдяки середній вантажопідйомності, він може виконувати як тривалі спостережні польоти, так і транспортування невеликих вантажів.

У дослідженні порівнюються два типи акумуляторів:

- LiPo акумулятор 6S ємністю 10 Ah, що відзначається високою віддачею струму (до 150-200 A) та відносно невеликою вагою. Такий тип батарей традиційно використовується у FPV-дронах для високонавантажених режимів (гонки, швидкісні польоти, перевезення важких вантажів).
- Li-Ion акумулятори на базі елементів Molicel P42A (4.2 Ah, 45 A макс. розряд на елемент). Всі Li-Ion батареї зібрані методом зварювання з використанням біметалевих стрічок з міді (0,15×10 мм) та нікельованого заліза. Для збільшення ємності й допустимого струму розглядаються три конфігурації:
 - 6S2P (12 елементів, 8.4 Ah, 90 A макс.);
 - 6S3P (18 елементів, 12.6 Ah, 135 A макс.);
 - 6S4P (24 елементи, 16.8 Ah, 180 A макс.).

Основні характеристики акумуляторів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики акумуляторів для 10-дюймового FPV-дрона

Тип батареї	Конфігурація	Ємність, Ah	Напруга, V (ном.)	Макс. струм, A	Орієнтовна маса, г	Орієнтовна ціна, \$
LiPo	6S	10.0	22.2	150-200	~1200	~110
Li-Ion Molicel P42A	6S2P	8.4	21.6	90	~1000	~55
Li-Ion Molicel P42A	6S3P	12.6	21.6	135	~1500	~75
Li-Ion Molicel P42A	6S4P	16.8	21.6	180	~2000	~95

Умови експлуатації акумуляторів:

- LiPo: робочий діапазон температур від 0°C до +40°C, допустимий струм розряду у 15-20 разів більше номінальної ємності, кількість циклів – 250-300.
- Li-Ion (Molicel): робочий діапазон температур від -10 °C до +45 °C, допустимий струм розряду в межах 10-12 разів від номінальної ємності, кількість циклів – 400-600.

Методика розрахунку:

1. Для кожного сценарію використання задається додаткове навантаження на дрон (0; 0,5; 1,5; 3,0 кг).
2. Орієнтовна споживана потужність визначається на основі типових характеристик 10-дюймових моторів 3115 900 kv із пропелерами стандартного розміру 10x5x3.
3. Час польоту оцінюється як відношення корисної ємності батареї до середнього споживаного струму. При розрахунках орієнтовного часу польоту враховано середню ефективність електродвигунів на рівні 80-85% та аеродинамічний опір корпусу, який у розрахунках представлений зведеним коефіцієнтом $C_d = 1.05C_{d0} = 1.05Cd = 1.05$. Це дозволило наблизити результати до реальних умов експлуатації дронів середнього класу.

4. Додатково враховується вплив ваги акумулятора на загальну масу дрона.

5. Порівняння проводиться за такими критеріями: час польоту, можливість безпечного струмового навантаження, економічна доцільність

Для оцінки ефективності різних акумуляторів було розглянуто шість сценаріїв використання 10-дюймового FPV-дрона:

1. Патрулювання / відеоспостереження (без навантаження).
 2. Доставка легкого вантажу (0.5 кг).
 3. Доставка середнього вантажу (1.5 кг).
 4. Доставка великого вантажу (3.0 кг).
 5. Одноразова «one-way» місія (максимальна дальність, допускається втрата дрона).
 6. Швидкісний режим / гонка.
- Основними критеріями для порівняння стали:
- Час польоту (у хвилинали).
 - Дальність польоту (у кілометрах, за середньої швидкості 40-50 км/год для крейсерського режиму).
 - Економічна ефективність (співвідношення вартості батареї до її практичних можливостей).

Орієнтовні результати розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Орієнтовний час та дальність польоту для різних сценаріїв

Сценарій	Оптимальний акумулятор	Час польоту, хв	Дальність, км	Орієнтовна ціна батареї, \$	Коментар
Патрулювання / спостереження (0 кг)	Li-Ion 6S3P	~45	30-35	75	Найкращий баланс ваги й ємності
Легкий вантаж (0.5 кг)	Li-Ion 6S3P	~40	25-30	75	Дає можливість працювати до 30 км
Середній вантаж (1.5 кг)	Li-Ion 6S4P	~35	20-25	95	Дрон зберігає стабільність та запас по струму
Великий вантаж (3.0 кг)	Li-Ion 6S4P	~18	15-18	95	Реально допустимий варіант для 10" платформи
One-way місія (без вантажу)	Li-Ion 6S4P	~55-60	40-50	95	Максимальна дальність, без повернення
Швидкісний режим / гонка	LiPo 6S 10Ah	~8-10	10-15	110	Забезпечує високу віддачу струму

З таблиці видно, що Li-Ion акумулятори вигідніші для тривалих місій, патрулювань та доставки, тоді як LiPo краще проявляє себе у високонавантажених режимах, де потрібна миттєва віддача струму.

Аналіз отриманих результатів показує, що ефективність системи живлення FPV-дрона визначається не лише ємністю чи масою акумуляторної батареї, а насамперед збалансованістю між питомою енергією, допустимим струмовим навантаженням та термічними характеристиками. Літій-іонні збірки демонструють стабільні показники напруги протягом більшої частини розряду, що позитивно впливає на ефективність роботи двигунів і стабільність польоту. Натомість літій-полімерні акумулятори краще витримують пікові навантаження, але швидше втрачають напругу в кінці циклу, що обмежує загальну тривалість польоту.

Таким чином, вибір типу акумуляторної батареї повинен ґрунтуватися на пріоритетах конкретної місії: якщо необхідна максимальна тривалість та стабільність живлення – доцільно використовувати Li-Ion 6S3P, а якщо головним критерієм є швидкість реакції системи та потужність – LiPo 6S 10Ah. Розрахункові дані свідчать, що при однаковій масі платформи Li-Ion забезпечує ефективніше використання запасеної енергії, тоді як LiPo переважає у коротких, високодинамічних сценаріях.

При цьому різниця у вартості акумуляторів досить суттєва: Li-Ion у зборі виходить дешевше, особливо у конфігураціях 6S2P та 6S3P, тоді як LiPo вартує майже удвічі дорожче.

Аналізуючи отримані дані, можна зробити кілька важливих висновків щодо вибору акумуляторних батарей для різних сценаріїв застосування FPV-дрона.

По-перше, акумулятори формату Molicel P42A 6S3P виявилися найбільш універсальними. Вони забезпечують оптимальний баланс між тривалістю польоту (18-20 хв), допустимим струмовим навантаженням (90-100 А) та вартістю. Такий варіант підходить як для

завдань патрулювання та спостереження, так і для транспортування легких вантажів.

6S2P показали обмежені можливості у випадках, коли навантаження сягає понад 1 кг, оскільки зростає споживання струму, і акумуляторна батарея швидко втрачає заряд. Водночас цей варіант є найдешевшим і може бути економічно доцільним для нескладних завдань.

6S4P виглядає привабливим для «one-way» місій, де головне – максимальна дальність польоту без повернення. Більша ємність дозволяє досягти помітно більшої дистанції, але збільшена маса робить його менш ефективним у звичайних сценаріях.

LiPo 6S 10Ah продемонстрували себе найкраще саме у швидкісному режимі. Незважаючи на відносно короткий час у повітрі (~8-10 хв), вони забезпечують потужну та стабільну віддачу струму, що критично для динамічних маневрів, перегонів або швидкого переходу цілі. Тут важливим є не стільки тривалість польоту, скільки можливість використання високих струмів без шкоди для акумулятора.

У практичному сенсі можна виділити такі рекомендації:

- для патрулювання й відеоспостереження найкраще підійде 6S3P;
- для перевезення легких і середніх вантажів – 6S3P, у випадку більших навантажень – 6S4P;
- для одноразових далеких місій – 6S4P;
- для швидкісних польотів та перегонів – виключно LiPo.

Таким чином, жоден із варіантів не є універсальним у всіх сценаріях. Якщо є бажання мати найбільш універсальну збірку, яка дозволяє ефективно виконувати більшість завдань – від патрулювання до перевезення легких і середніх вантажів – варто обирати Li-Ion 6S3P. Остаточний вибір акумулятора завжди залежить від конкретної задачі: чи важливіше максимальна

дальність, чи стабільність струму, чи економічна доцільність.

Для кращого розуміння додаємо фото дрону 6S3P на рис. 1 і рис. 2.



Рис. 1 – FPV-дрон з акумуляторною батареєю 6s3p Molicel P42A



Рис. 2 – FPV-дрон з акумуляторною батареєю 6s3p Molicel P42A готовий до польоту

Висновки

1. Найбільш універсальною акумуляторною збіркою для 10-дюймового FPV-дрона є Li-Ion Molicel P42A 6S3P, яка забезпечує достатній час польоту, можливість перевезення легких і середніх вантажів та економічну доцільність. Зокрема, конфігурація Li-Ion 6S3P забезпечує до 45 хв польоту без навантаження, що на 50-60 % більше, ніж у стандартної LiPo 6S 10Ah батареї за аналогічних умов. При навантаженні 1,5 кг перевага зберігається на рівні 30-35 %.

2. Для завдань патрулювання, відеоспостереження та доставки легких вантажів (до 1,5 кг) Li-Ion

6S3P забезпечує оптимальний баланс між вагою батареї, ємністю та витривалістю до циклів заряду.

3. Для перевезення великого вантажу (3,0 кг) або виконання «one-way» місії доцільно використовувати Li-Ion 6S4P, яка дозволяє досягти максимальної дальності польоту, проте збільшена вага робить її менш ефективною для звичайних задач.

4. Для швидкісних польотів, перегонів та завдань, що потребують миттєвої потужності, слід застосовувати LiPo 6S 10Ah, навіть якщо час польоту обмежений (~8-10 хв).

5. Вибір акумулятора повинен завжди відповідати конкретному сценарію використання: економія коштів, дальність польоту, стабільність струму та динамічні характеристики дрона.

Перспективи подальших досліджень:

- Оптимізація пропелерів та аеродинамічних характеристик для підвищення ефективності.
- Випробування дронів у різних температурних умовах для оцінки роботи батарей.
- Дослідження впливу різних типів навантажень на ресурс акумулятора.
- Дослідження інших сценаріїв роботи FPV-дрона, включно з комбінованими місіями та «експериментальними» режимами.
- Порівняння акумуляторів, виготовлених з Li-Ion елементів інших виробників та з різними типами зварювальних стрічок, для оцінки впливу на ефективність та надійність.

Перелік використаних джерел

- [1] A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements / A. Townsend et al. *Heliyon*. 2020. Vol. 6, iss. 1. Article e05285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05285>.
- [2] Muli C., Park S., Liu M. A comparative study on energy consumption models for drones. *Internet of Things : Proceedings of the 5th The Global IoT Summit*, Dublin, Ireland, 20-23 June 2022. Pp. 199-210. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20936-9_16.
- [3] Traub L. W. Range and Endurance Estimates for Battery-Powered Aircraft. *Journal of Aircraft*. 2011. Vol. 48, № 2. Pp. 703-707. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.C031027>.
- [4] Traub L. W. Validation of endurance estimates for battery powered UAVs. *The Aeronautical Journal*. 2013. Vol. 117, iss. 1197. Pp. 1155-1166. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0001924000008757>.
- [5] Comprehensive investigation on lithium batteries for electric and hybrid-electric UAV applications / Xiao C., Wang B., Zhao D., Wang C. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101677>.
- [6] Using Li-ion Battery Packs for Long Range FPV Drone Flying: Pros, Cons, and Recommendations.

URL: <https://oscarliang.com/li-ion-battery-long-range>
(дата звернення: 18.07.2025).

- [7] Aghakhani S., Beigi P., Rajabi M. S. An overview of drone energy consumption factors and models. *Handbook of Smart Energy Systems*. Springer, 2022. Pp. 1-20. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72322-4_200-1.
- [8] Kaya M. N., Bayrak Z. U. Detailed analysis of Li-ion batteries for use in unmanned aerial vehicle applications. *Turkish Journal of Science & Technology*. 2024. Vol. 19(1). Pp. 295-304. DOI: <https://doi.org/10.55525/tjst.1437348>.
- [9] Amanor-Boadu J. M., Guiseppi-Elie A. Improved Performance of Li-ion Polymer Batteries Through Improved Pulse Charging Algorithm. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(3). Article 895. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10030895>.
- [10] Energy consumption models for delivery drones: a comparison and assessment / Zhang J., Campbell J. F., Sweeney II D. C., Hupman A. C. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021. Vol. 90. Article 102668. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102668>.
- [11] Technical and economic feasibility of applying fuel cells as power source for small UAVs / G. Mariscal et al. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.118005>.
- [12] Energy consumption and efficiency degradation predictive analysis in unmanned aerial vehicle batteries using deep neural networks / L. A. Al-Haddad et al. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2025. Vol. 1, iss. 5. Pp. 21-30. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/201346>.
- [13] Nagori M., Nath D. Battery Management System in Autonomous Drones. *Proceedings of the 3rd International Conference on Futuristic Technology (INCOFT 2025)*, Pune, India, 21-22 February 2025. Vol. 3. Pp. 393-399. DOI: <https://doi.org/10.5220/0013618000004664>.
- [14] G. A. Q. Abdulrahman et al. A review of powering unmanned aerial vehicles by clean and renewable energy technologies / Abdulrahman G. A. Q., Qasem N. A. A., Abdelrahman W. G., Abdallah A. M. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2025. Vol. 73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104150>.

SELECTING THE OPTIMAL BATTERY FOR A 10-INCH FPV DRONE IN CIVIL MISSIONS: ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY AND AUTONOMY (COMPARISON OF MOLICEL P42A 6S2P/3P/4P AND LIPO 6S 10AH)

Hoshko M.O.

PhD (Engineering), associate professor, Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, e-mail: m121314@ukr.net;

Hoshko M.M.

M.Sc., Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, e-mail: RunUkraine@ukr.net

The study focuses on the analysis and optimization of energy supply systems for unmanned aerial vehicles (UAVs), specifically FPV drones equipped with 10-inch propellers, to increase flight duration and operational efficiency under various civilian application scenarios. With the rapid expansion of drone usage in fields such as agriculture, environmental monitoring, logistics, and technical inspection, the issue of selecting the most efficient power source has become particularly relevant. The research aims to determine the optimal type of battery in terms of weight, energy density, endurance, and cost-effectiveness, ensuring reliable operation and sufficient energy reserve for different mission profiles. The article presents a comparative analysis between a lithium-polymer (LiPo) battery pack (6S, 10Ah) and three lithium-ion (Li-Ion) battery assemblies based on Molicel P42A cells with different configurations: 6S2P, 6S3P, and 6S4P. The analysis includes both theoretical calculations and practical considerations derived from known empirical data. Each configuration was evaluated based on three main criteria – flight time, maximum range, and overall economic viability. Additionally, the influence of payload mass (0–3 kg) on flight duration and efficiency was modeled for six key mission scenarios: observation and video surveillance, light and medium cargo delivery, heavy cargo delivery, one-way missions, and high-speed flight operations. Methodologically, the work takes into account motor efficiency (0.8–0.85), aerodynamic drag, and the voltage behavior of both LiPo and Li-Ion systems under load. The results demonstrate that Li-Ion batteries offer a higher specific energy density (up to 180 Wh/kg) and lower cost per watt-hour compared to LiPo alternatives, though their discharge characteristics limit maximum current output. Among the tested configurations, the Li-Ion 6S3P assembly showed the most balanced performance, providing a flight time of up to 45 minutes without payload and maintaining stable voltage throughout the discharge cycle. The LiPo 6S 10Ah pack remains advantageous for high-current, short-duration missions such as racing or rapid-response operations due to its superior instantaneous power output. The study concludes that no single battery configuration is universally optimal for all use cases. However, the Li-Ion 6S3P pack can be considered the most versatile and practical solution for multi-purpose civilian FPV platforms, combining reasonable cost, low weight, and extended endurance. The article also provides recommendations for selecting power systems depending on the mission profile and discusses the practical aspects of battery assembly, including the use of bi-metal

copper and nickel-plated steel strips (0.15×10 mm) to ensure low resistance and reliable current transfer during high-load operation. The findings highlight the need for further experimental validation under real-world flight conditions, as well as future research focused on optimizing propeller geometry, assessing temperature impacts, and integrating hybrid power systems for small UAVs. The proposed analytical framework and results can serve as a methodological foundation for engineers, drone developers, and energy system designers seeking to enhance the performance and energy efficiency of modern FPV drones.

Keywords: FPV drone, rechargeable battery, LiPo, Li-ion, unmanned aerial vehicles, energy efficiency.

References

- [1] A. Townsend, I.N. Jiya, C. Martinson, D. Bessarabov, and R. Gouws, "A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements," *Heliyon*, vol. 6, iss. 1, article e05285, 2020. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05285.
- [2] C. Muli, S. Park, and M. Liu, "A comparative study on energy consumption models for drones," in *Proc. of the 5th The Global Internet of Things Summit*, Dublin, Ireland, June 2023, 2022, pp. 199-210. doi: 10.1007/978-3-031-20936-9_16.
- [3] L.W. Traub, "Range and Endurance Estimates for Battery-Powered Aircraft," *Journal of Aircraft*, vol. 48, № 2, pp. 703-707, 2011. doi: 10.2514/1.C031027.
- [4] L.W. Traub, "Validation of endurance estimates for battery powered UAVs," *The Aeronautical Journal*, vol. 117, iss. 1197, pp. 1155-1166, 2013. doi: 10.1017/S0001924000008757.
- [5] C. Xiao, B. Wang, D. Zhao, and C. Wang, "Comprehensive investigation on lithium batteries for electric and hybrid-electric UAV applications," *Journal of Energy Storage*, vol. 38, 2023. doi: 10.1016/j.tsep.2023.101677.
- [6] Using Li-ion Battery Packs for Long Range FPV Drone Flying: Pros, Cons, and Recommendations. [Online]. Available: <https://oscarliang.com/li-ion-battery-long-range>. Accessed: July 07, 2025.
- [7] S. Aghakhani, P. Beigi, and M.S. Rajabi, "An overview of drone energy consumption factors and models," in *Handbook of Smart Energy Systems*. Springer, 2022, pp. 1-20. doi: 10.1007/978-3-030-72322-4_200-1.
- [8] M.N. Kaya, and Z.U. Bayrak, "Detailed analysis of Li-ion batteries for use in unmanned aerial vehicle applications," *Turkish Journal of Science & Technology*, vol. 19(1), pp. 295-304, 2024. doi: 10.55525/tjst.1437348.
- [9] J.M. Amanor-Boadu, and A. Guiseppi-Elie, "Improved Performance of Li-ion Polymer Batteries Through Improved Pulse Charging Algorithm," *Applied Sciences*, vol. 10(3), article 895, 2020. doi: 10.3390/app10030895.
- [10] J. Zhang, J.F. Campbell, D.C. Sweeney II, and A.C. Hupman, "Energy consumption models for delivery drones: a comparison and assessment," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 90, article 102668, 2021. doi: 10.1016/j.trd.2020.102668.
- [11] G. Mariscal, C. Depcik, H. Chao, G. Wu, and X. Li, "Technical and economic feasibility of applying fuel cells as power source for small UAVs," *Energy Conversion and Management*, vol. 301, 2024. doi: 10.1016/j.enconman.2023.118005.
- [12] L.A. Al-Haddad et al., "Energy consumption and efficiency degradation predictive analysis in unmanned aerial vehicle batteries using deep neural networks," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 1, iss. 5, pp. 21-30, 2025. doi: 10.12913/22998624/201346.
- [13] M. Nagori, and D. Nath, "Battery Management System in Autonomous Drones," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Futuristic Technology (INCOFT 2025)*, Pune, India, Feb. 21-22, 2025, vol. 3, pp. 393-399. doi: 10.5220/0013618000004664.
- [14] G.A.Q. Abdulrahman, N.A.A. Qasem, W.G. Abdelrahman, and A.M. Abdallah, "A review of powering unmanned aerial vehicles by clean and renewable energy technologies," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 73, 2025. doi: 10.1016/j.seta.2024.104150.

Стаття надійшла 24.09.2025

Стаття прийнята 15.10.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Гошко М. О., Гошко М. М. Вибір оптимального акумулятора для 10-дюймового FPV-дрона у цивільних місіях: аналіз енергоефективності та автономності (порівняння Molicel P42A 6S2P/3P/4P та LiPo 6S 10AH). *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 134-140. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344829>.

**ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ
ВИТКОВОГО ЗАМИКАННЯ СТАТОРНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНА
ПРИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ ЖИВЛЕННЯ**

Прокопенко С.О.	аспірант, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ;
Кривоносов В.Є.	д-р техн. наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8219-021X , e-mail: kryvonosov@nubip.edu.ua ;
Кривоносов В.В.	аспірант, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7083-7881 , e-mail: krivonosov.val05@gmail.com ;
Савенко О.С.	канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8108-2575 , e-mail: savenko_o_s@pstu.edu

У статті розглянуто актуальну проблему підвищення достовірності виявлення міжвиткових коротких замикань у статорних обмотках асинхронних двигунів (АД) за умов динамічно змінних та несиметричних напруг живлення. Проаналізовано сучасні методи функціональної діагностики, включно з аналітичними підходами, методами обробки сигналів, машинного навчання та системами на основі симетричних компонент. Показано, що більшість існуючих рішень недостатньо враховують вплив коливань показників якості електроенергії та змін навантаження на валу АД, що знижує точність раннього виявлення виткових замикань. Запропоновано перспективний напрям удосконалення функціонального методу діагностування шляхом комплексного використання миттєвих значень фазних струмів і напруг, параметрів схеми заміщення та статистичної обробки даних. Наведено програму експериментальних досліджень впливу динамічних змін параметрів мережі та режимів роботи електродвигуна на інформативні ознаки дефекту. Отримані результати створюють підґрунтя для підвищення чутливості та надійності систем ранньої діагностики асинхронних двигунів за умов несиметрії напруг живлення.

Ключові слова: виткове замикання, функціональна діагностика, діагностичні критерії, статистичний аналіз, параметри схеми заміщення електродвигуна.

Постановка проблеми

Асинхронні електродвигуни (АД) є основою сучасного електроприводу електротехнічних комплексів; їхня частка становить близько 80% усього електрообладнання підприємства. Раптове, несанкціоноване відключення електродвигуна від мережі живлення призводить до зупинки технологічного обладнання, пошкодження машин, сировини та до значних економічних втрат.

За даними статистики, понад 60% випадків виходу з ладу АД пов'язані з пошкодженням ізоляції обмотки статора. Основною причиною є передчасне динамічне та термічне старіння ізоляції, що призводить до пошкодження провідникової та пазової частин обмотки.

Унаслідок зниження діелектричних властивостей ізоляції виникають пошкодження у статорних обмотках АД – виткові та міжфазні замикання, які з часом переростають у коротке замикання.

Міжвиткові замикання викликають появу несиметрії фазних струмів; контроль коефіцієнтів несиметрії струмів і напруги дає змогу виявити початок розвитку виткового замикання [1, 2].

Замикання в обмотках статора АД є аварійними та призводять до раптового відключення двигуна від мережі живлення існуючими засобами релейного

захисту, наприклад, струмовим відсіченням чи тепловим захистом.

На тлі динамічних змін показників якості електроенергії існуючі методи функціонального діагностування виткових замикань мають обмежену достовірність і чутливість.

Аварійний вихід АД з ладу під час експлуатації призводить до небезпечних ситуацій та матеріальних збитків, зокрема через зупинку технологічного процесу або судна у відкритому морі, а також через подальший ремонт двигуна.

Тому розроблення нових методів контролю технічного стану електродвигуна і режимів його роботи є актуальним завданням сьогодення. Вирішення цього питання дасть змогу знизити збитки від негативних наслідків аварійного виходу з ладу АД шляхом своєчасного виявлення дефектів на ранній стадії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Пошкодження статорної обмотки за характером несправностей розподіляються так: міжвиткові замикання – 85% (із них 95% виникають у лобовій частині обмотки), пробі міжфазної ізоляції – 11%, пробі ізоляції на корпус – 4%. Коли замиканню піддається понад 40% витків у пазу обмотки статора, виникає несиметрія струмів, яку можуть виявити більшість

пристроїв захисту від несиметричних режимів, що призводить до відключення такого АД від мережі. Замикання 2-15% витків не спричиняють істотних перекосів струмів між фазами і двигун продовжує працювати в штатному режимі.

Небезпека полягає в тому, що в місці замикання утворюються короткозамкнені витки, у яких індукється струм, що спричиняє додаткове нагрівання сусідніх непошкоджених витків. За тривалого теплового впливу ізоляція справних витків починає прискорено старіти, що з часом призводить до серйозних аварій – міжфазного замикання або замикання на корпус.

Так, у роботі [3] показано, що за міжвиткового замикання до 15% витків у пазу перехід до міжфазного замикання або замикання на корпус відбувається через 3-6 місяців, а якщо провідники замикаються через дугу, то час скорочується до кількох секунд. Для АД, які мають міжвиткові замикання 30-50 % витків у пазу, аварійний режим настає через 200-300 годин експлуатації.

Виявлення міжвиткових коротких замикань у працюючих АД в режимі онлайн залишається важливим напрямом наукових досліджень.

Методології діагностики несправностей можна розділити на три основні класифікації:

- Методи, засновані на аналітичних підходах. Наприклад, у роботі [4] автори пропонують інтегровану структуру для діагностики та прогнозування стану електричних машин на основі моделі, що описує рівні серйозності несправностей. Запропоновано універсальний метод, який використовує кілька індикаторів несправностей для діагностики та фільтр частинок для прогнозування міжвиткових замикань у статорних обмотках електричних машин. У статті відсутні дослідження, що враховують динамічні зміни параметрів мережі живлення.

- Методи на основі обробки сигналів і машинного навчання. У роботі [5] авторами представлено систему онлайн-обробки сигналів та машинного навчання (ML), розроблену для ранньої діагностики міжвиткових замикань статора (SITF) у трифазних асинхронних двигунах із короткозамкненим ротором. Система зосереджується на оцінюванні швидкості двигуна та використовує лише значення струмів статора.

У статті запропоновано застосування вибраних гармонік разом із моделями машинного навчання для оцінки індикатора ступеня несправності, який розроблено на основі фізичних закономірностей процесу відмови двигуна.

Водночас неврахування змін напруги мережі живлення може призвести до некоректного виявлення несправностей.

У роботі [6] описано детальну аналітичну модель, яка включає точне моделювання індуктивності з урахуванням гармонік пазів ротора (RSH) як для справних, так і для двигунів із міжвитковими замиканнями (SIT). Запропонована модель розроблена аналітично, покроково, з урахуванням особливостей RSH.

Представлено детальний, але спрощений аналіз, що враховує як гармоніки магніторушійної сили, так і гармоніки потоку в повітряному зорі.

На наступному етапі моделювання запропоновано асиметричну модель, яка описує замикання SIT в одній із фаз асинхронного двигуна. У моделі також враховано вплив насичення. Запропоновану модель перевірено шляхом порівняння результатів моделювання в перехідному, сталому та частотному режимах з експериментальними даними. Порівняння показало високий ступінь кореляції з результатами, отриманими на реальному двигуні. Внесок цієї роботи обґрунтовано порівнянням запропонованої моделі з існуючими. Крім того, у статті доведено, що частотна сигнатура, пов'язана з RSH, присутня в лінійному струмі й може бути використана для ідентифікації замикань SIT.

У роботі [7] авторами представлено спрощену та практичну методологію виявлення міжвиткових коротких замикань в асинхронних двигунах із короткозамкненим ротором за різних умов механічного навантаження. Для цього використано одновимірну згорткову нейронну мережу (1D-CNN), розширену залишковими блоками та навчену на диференційованих сигналах струму статора, отриманих у різних режимах навантаження. Однак у статті не розглянуто вплив показників якості електроенергії на достовірність виявлення дефектів.

- Методи обробки сигналів. Так, у роботі [8] автори пропонують виявлення та діагностику електричних несправностей у статорній обмотці трифазних асинхронних двигунів за допомогою аналізу магнітного потоку та вібраційних сигналів. Встановлено зв'язок між основними електричними несправностями (міжвитковими короткими замиканнями та незбалансованою напругою живлення) і сигналами магнітного потоку та вібрації, що дозволяє визначити характерні частоти цих дефектів. Однак у статті не розглянуто вплив динамічних змін напруги та навантаження.

У роботах [9, 10] автори дослідили частотні складові фазних струмів як можливість виявлення виткових замикань. У струмах виявлено наявність другої гармонійної складової, що є ознакою зниження виткової ізоляції.

- Діагностичні системи на основі даних. Так, у роботах [11-16] авторами розглянуто використання систем штучного інтелекту та нейронних мереж інтерпретованого глибокого навчання. Такі системи використовують бази даних, отримані за допомогою відомих методів контролю як функціональних параметрів, так і різних датчиків.

Аналіз літературних джерел свідчить, що виявлення виткових замикань у статорних обмотках електродвигуна є надзвичайно важливим саме під час роботи двигуна.

У роботі [17] авторами розглянуто метод виявлення міжвиткових коротких замикань у статорних обмотках машин на основі спектрального аналізу струму статора як справних, так і пошкоджених двигунів.

У роботі [18] проаналізовано перехідні процеси пускових струмів, які відображають асиметрію, спричинену початковим коротким замиканням, і містять інформативні ознаки несправності. Використання дисперсійного аналізу дозволяє контролювати розвиток короткого замикання.

У роботі [19] представлено метод ідентифікації міжвиткових коротких замикань в асинхронних двигунах під час зміни струму навантаження. Метод ґрунтується на гібридному аналітичному підході, що поєднує генетичний алгоритм та імітацію відпалу. Його суть полягає у визначенні опорних матриць та обчисленні відстані між значеннями опорної та тестової матриць.

У роботі [20] представлено онлайн-метод діагностики міжвиткових замикань статора трифазних асинхронних двигунів на основі концепції симетричних компонент. Струм зворотної послідовності забезпечує ефективний і швидкий спосіб моніторингу для виявлення коротких замикань у статорі.

Зміна співвідношення струмів зворотної та прямої послідовностей використовується як основний індикатор несправності, що подається на вхід нейронної мережі. Вихідні дані нейронної мережі прямого поширення із зворотним зв'язком дають змогу класифікувати рівень короткого замикання статорної обмотки.

У наведених роботах не доведено застосування комплексного підходу до визначення виткових замикань із урахуванням динамічних змін несиметрії напруги живлення та навантаження на валу АД.

Таким чином, раннє виявлення міжвиткових коротких замикань має фундаментальне значення для запобігання подальшому пошкодженню електродвигуна. Стаціонарний аналіз у ряді випадків є недостатньо адекватним, зокрема для ненавантажених машин, механізмів із коливальним моментом або за наявності флуктуацій напруги та частоти в мережі живлення.

Мета статті

Аналіз існуючих методів виявлення виткового замикання у обмотках статора АД методами функціональної діагностики. Розробка напрямку та програми дослідження впливу динамічних змін показників якості електроенергії та навантаження на валу АД для своєчасного контролю стану АД та мережі живлення.

Матеріали та методи

Для проведення досліджень використано асинхронний двигун, що входить до складу лабораторної установки. Експерименти виконано із застосуванням електричного методу дослідження та статистичного аналізу отриманої бази даних.

Виклад основного матеріалу

Технічна діагностика – це інструмент забезпечення безвідмовної роботи технічних об'єктів.

Діагностика являє собою процес оцінювання фактичного стану об'єкта, за результатами якого приймається рішення щодо його подальшої експлуатації або проведення ремонту.

Процес оцінювання технічного стану електричних машин у промисловості, на транспорті чи в інших галузях передбачає виявлення та ідентифікацію небажаних робочих станів.

Сукупність робочих станів – це послідовність цілеспрямованих дій, що виконуються машиною протягом певного інтервалу часу.

Діагностична система повинна забезпечувати виявлення та ідентифікацію виникнення несправностей у режимі реального часу або на ранніх етапах їх розвитку.

Застосування контролю параметрів мережі живлення, фазних струмів АД та частоти обертання ротора розглянуто в роботах [21].

Для виявлення початкового моменту появи виткових замикань у статорних обмотках АД важливим є встановлення критеріальних залежностей між вимірюваними миттєвими та розрахунковими величинами параметрів напруги живлення й фазних струмів двигуна.

У цьому випадку доцільно використовувати теорію множин випадкових подій і елементи булевої алгебри.

Розглядаються такі множини значень:

– множина вимірюваних векторів робочих фазних струмів:

$$\underline{I}_a \in \{\underline{I}_a\}, \underline{I}_b \in \{\underline{I}_b\}, \underline{I}_c \in \{\underline{I}_c\}; \quad (1)$$

– множина вимірюваних векторів фазних (лінійних) напруг:

$$\underline{U}_a \in \{\underline{U}_a\}, \underline{U}_b \in \{\underline{U}_b\}, \underline{U}_c \in \{\underline{U}_c\}; \quad (2)$$

– множина частоти мережі:

$$f_{п.с.} \in \{f_{п.с.}\}; \quad (3)$$

– множина значень швидкості обертання ротора АД:

$$n_{рот} \in \{n_{рот}\}; \quad (4)$$

– множина значень коефіцієнта, що визначає зміну числа витків в пазу статора обмотки при виткових замиканнях:

$$k_{\Delta w} \in \{k_{\Delta w}\}. \quad (5)$$

Критеріальні залежності визначені для режиму миттєвих значень, умовами якого є:

$$f_{п.с.} = \text{const}; \underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c - \text{const}; n_{рот} - \text{const}.$$

Критерієм нормальної роботи АД є функції:

$$a) F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{1, 1, 1\} = \underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c,$$

при $\underline{U}_a \neq 0, \underline{U}_b \neq 0, \underline{U}_c \neq 0$ відповідають справжньому значенню – логічна «1»;

$$b) F(\{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\}, \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\}, \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}) = \{1, 1, 1\} =$$

$$= \{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\} / \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\} / \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\},$$

при $\{I_a \cap I_{ap}\}, \{I_b \cap I_{bp}\}, \{I_c \cap I_{cp}\}_a$ відповідають справжньому значенню – логічна «1»,

де I_{ap}, I_{bp}, I_{cp} – розрахункові значення векторів фазних струмів АД.

$$I_{ap}, I_{bp}, I_{cp} = \Phi(\{U_a, U_b, U_c\}, n_{pom}, f_{II.C.}, \{Z_{wi}\}), \quad (6)$$

Z_{wi} – повний комплексний опір схеми заміщення АД в i -й фазі.

Критерієм неповнофазного режиму напруги мережі живлення є функція:

$$F(U_a, U_b, U_c) = \{0, 0, 0\} = \{U_a / U_b\} \vee \{U_a / U_c\}. \quad (7)$$

Критерієм «обриву, недовмикання однієї з фаз струмових ланцюгів, пошкодження кабельної лінії та ін.» є виконання умови:

$$F_1\{F(U_a, U_b, U_c), F(I_a, I_b, I_c)\} = (U_a / U_b / U_c) / (\{I_a / I_b\} \vee \{I_a / I_c\}), \quad (8)$$

де $F(U_a, U_b, U_c) = \{1, 1, 1\} = U_a / U_b / U_c$ – функція відповідає наявності ненульових значень фазної напруги;

$F(I_a, I_b, I_c) = \{0, 0, 0\} = \{I_a / I_b\} \vee \{I_a / I_c\}$ – функція відповідає відсутності струму в одній із фаз,

а $I_a \neq 0, I_b \neq 0, I_c \neq 0$ відповідають справжньому значенню – логічна «1».

Критерії виявлення початкового моменту міжвиткового замикання в статорній обмотці АД:

$$a) F(U_a, U_b, U_c) = \{1, 1, 1\} = U_a / U_b / U_c,$$

$$b) F(\{I_a \setminus I_{ap}\}, \{I_b \setminus I_{bp}\}, \{I_c \setminus I_{cp}\}) = \{0, 0, 0\} = \{I_a \setminus I_{ap}\} \setminus \{I_b \setminus I_{bp}\} \setminus \{I_c \setminus I_{cp}\}$$

при $\{I_a \cap I_{ap}\}, \{I_b \cap I_{bp}\}, \{I_c \cap I_{cp}\}_a$ відповідають справжньому значенню – логічна «1».

Критеріальні залежності дозволили розробити програмне забезпечення для роботи мікроконтролера пристрою [22], що реалізує спосіб діагностики та захисту АД від неповнофазних режимів та виткових замикань.

Достовірність розробленого методу виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання при використанні миттєвих значень (векторів) при виконанні умов:

$$1. \frac{dU_a}{dt} \neq \frac{dU_b}{dt} \neq \frac{dU_c}{dt} \neq 0; \quad \frac{dI_a}{dt} \neq \frac{dI_b}{dt} \neq \frac{dI_c}{dt} \neq 0; \quad \frac{d\omega_r}{dt} \neq 0, \text{ де } \omega_r - \text{швидкість ротора АД.}$$

Не є коректним та потребує збір бази даних значень струмів, напруг, швидкості та використання статистичної обробки.

2. Оскільки загальний опір асинхронного двигуна є основною складовою при визначенні розрахункового струму кожної фази, відповідно до Т-подібної схеми заміщення (рис. 1, а), комплексний опір фази АД з одношаровою обмоткою, намотаною одним провідником, визначається за виразом:

$$Z_{wi} = (1 - k_z)^2 \cdot$$

$$\cdot \left[\left(\frac{r_1}{1 - k_z} + jx_1 \right) + \frac{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \cdot \left(\frac{r_\mu}{(1 - k_z)^2} + jx_\mu \right)}{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + (r_\mu + j(1 - k_z)^2 x_\mu)} \right] \quad (9)$$

де Z_{wi} – повний комплексний опір АД в i -й фазі;

$k_z = \frac{k_{\Delta w}}{q_1}$ – коефіцієнт відношення замкнутих витків у пазу до загальної кількості витків в обмотці;

q_1 – кількість пазів фазової обмотки;

r_1, x_1 – активний та індуктивний опір розсіювання статорної обмотки;

r'_2, x'_2 – приведені до статорної обмотки

активний та індуктивний опір розсіювання роторної обмотки;

s – ковзання АД;

r_μ, x_μ – активний та індуктивний опір намагнічуючого контуру.

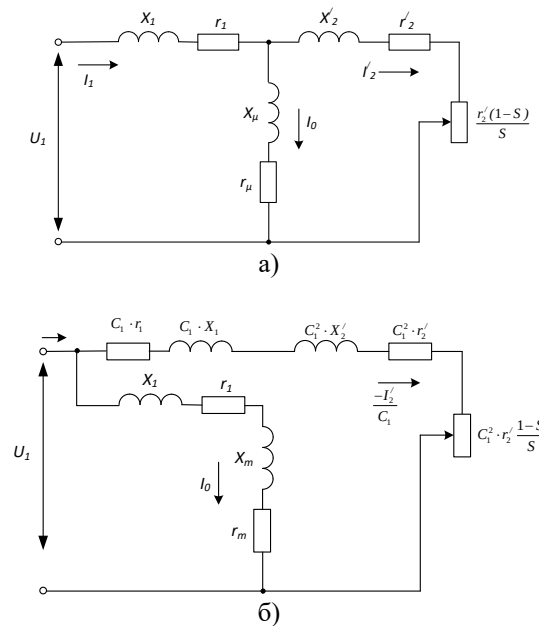


Рис. 1 – Схеми заміщення АД:
а) Т-подібна схема, б) Г-подібна

Комплексний опір кожної фази АД з одно- та двошаровими обмотками, з паралельними провідниками визначаємо виразом

$$Z_{mi} = \left(\frac{r_1}{1 + \frac{k_z}{(m_1 - n)}} + jx_1 \right) + \frac{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (10)$$

де m_1 – число паралельних провідників у котушці обмотки статора; n – число замкнених паралельних провідників.

При умові $\frac{ds}{dt} \neq const$ та $\frac{df}{dt} \neq const$, де f –

C1, C2, C3 – Конденсатори, призначені для фільтрації вимірюваних миттєвих значень напруги досліджуваної трифазної системи.

VS1, VS2, VS3, VS4, VS5, VS6 – Силкові тиристори, що формують 2 мости випрямлювача напруги за схемою «подвійної зірки Ларіонова».

R7 – Змінний опір (реостат) що використовується в якості навантаження випрямлювача напруги за схемою «подвійної зірки Ларіонова».

R11, R15, R19, R23, C4, C5, C6, C7 – Статичні опори та конденсатори RC-фільтрів в ланцюгах вимірювання фазних струмів досліджуваного навантаження

R9, R10, R13, R14, R17, R18, R21, R22 – Статичні опори, що формують дільник напруги для вимірювання фазних струмів досліджуваної трифазного навантаження.

R8, R12, R16, R20 – Статичні опори – шунти, для вимірювання фазних струмів досліджуваної трифазного навантаження.

TA1, TA2, TA3, TA4 – Трансформатори струму, для вимірювання струмів досліджуваного навантаження в фазі А, В, С та N відповідно

C8, C9, C10 – Конденсатори, що формують трифазну батарею для компенсації реактивної потужності/фільтрації.

M, G – Трифазний асинхронний двигун та з'єднаний з ним однофазний генератор, що використовується в якості досліджуваного навантаження.

R24 – Змінний опір (реостат) що використовується в якості навантаження однофазного генератора.

Висновки

Підвищення достовірності виявлення початкового моменту виникнення виткових замикань у статорних обмотках асинхронного двигуна за умов динамічно змінних параметрів мережі живлення та навантаження на валу потребує виконання таких дій:

1. Збір та постійне оновлення бази даних про стан мережі живлення й зміни фазних струмів асинхронного двигуна.

2. Застосування статистичного аналізу для обробки та інтерпретації отриманих даних.

3. Використання результатів обробки для визначення критеріальних параметрів виявлення початкового моменту виникнення виткових замикань як за детермінованих, так і за випадкових змін параметрів мережі живлення та функціональних характеристик асинхронного двигуна.

Перелік використаних джерел

- [1] Устройство для контроля и защиты электродвигателя от неполнофазных режимов и витковых замыканий: авт. свид. 1584028 СССР: SU 1584028. № 4389543/24-07; заявл. 09.03.88; опубл. 07.08.90. Бюл. № 29. 10 с.
- [2] Спосіб діагностики початкового моменту

виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна: пат. 124403 Україна: МПК G01R 31/00, H02H 7/09, H02H 7/08, H02H 1/00. № а201912168; заявл. 23.12.19; опубл. 08.09.21, Бюл. № 36. 7 с.

- [3] Jameson N. J., Azarian M. H., Pecht M. Improved electromagnetic coil insulation health monitoring using equivalent circuit model analysis. *International journal of electrical power & energy systems*. 2020. Vol. 119. Article 105829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105829>.
- [4] Model-based diagnosis and RUL estimation of induction machines under interturn fault / V. Nguyen et al. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53, iss. 3. Pp. 2690-2701. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2669195>.
- [5] Babu A. K., Seshadrinath J. Interacting multiple model framework for incipient diagnosis of interturn faults in induction motors. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 5. Pp. 5120-5129. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAI.2024.3405468>.
- [6] Ray S., Day D. Development of a comprehensive analytical model of an induction motor under conditions of stator interturn faults taking into account rotor slot harmonics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023. Vol. 70, iss. 2. Pp. 2037-2047. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3165294>.
- [7] Early detection of inter-turn short circuits in induction motors using the derivative of stator current and a lightweight 1D-ResNet / C. J. Morales-Perez et al. *Computation*. 2025. Vol. 13(6). Article 140. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation13060140>.
- [8] Lamim Filho P. C. M., Pederiva R., Brito J. N. Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2014. Vol. 42, iss. 1-2. Pp. 377-387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.08.033>.
- [9] Short-term fault feature extraction based on adaline for PMSM inter-turn short circuit diagnosis using residual insulation monitoring / D. Wei et al. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023. Vol. 70. Pp. 3103-3114. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3167164>.
- [10] Online detection of induction motor's stator winding short-circuit faults / Eftekhari M., Moallem M., Sadri S., Hsieh M.-F. *IEEE Systems Journal*. 2014. Vol. 8, iss. 4. Pp. 1272-1282. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2288172>.
- [11] Ayas S., Ayas M. S. A novel bearing fault diagnosis method using deep residual learning network. *Multi-media Tools and Applications*. 2022. Vol. 81, iss. 2. Pp. 22407-22423. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11617-1>.
- [12] Convolutional neural network based inter-turn fault diagnosis in LSPMSMs / L. S. Maraaba et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 81960-81970. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991137>.

- [13] Abid F. B., Sallem M., Brem A. Robust interpretable deep learning for intelligent fault diagnosis of induction motors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 69, iss. 6. Pp. 3506-3515. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2932162>.
- [14] Husari F., Seshadrinath J. Early stator fault detection and condition identification in induction motor using novel deep network. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 3, iss. 5. Pp. 809-818. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAI.2021.3135799>.
- [15] Fang Y., Wang M., Wei L. Deep transfer learning in inter-turn short circuit fault diagnosis of PMSM. *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Takamatsu, Japan, 8-11 August 2021. Pp. 489-494. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMA52036.2021.9512785>.
- [16] Oner M. U., Sahin I., Keysan O. Neural networks detect inter-turn short circuit faults using inverter switching statistics for a closed-loop controlled motor drive. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2023. Vol. 38, iss. 4. Pp. 2387-2395. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3274052>.
- [17] Joksimovic G. M., Penman J. The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000. Vol. 47, iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.873216>.
- [18] Transient envelope current analysis for inter-turn short-circuit detection in induction motor stator / Zaparoli I. O., Baccarini L. M. R., Lamim Filho P. C. M., Batista F. B. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020. Vol. 42. Article 97. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-020-2188-7>.
- [19] Identification of inter-turn short-circuits in induction motor stator winding using simulated annealing / M. Tomczyk et al. *Energies*. 2022. Vol. 15(1). Article 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010117>.
- [20] Induction motor stator interturn short circuit fault detection in accordance with line current sequence components using artificial neural network / Rajamany G., Srinivasan S., Rajamany K., Natarajan R. K. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019. Vol. 2019. Article 4825787. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4825787>.
- [21] Кривоносов В., Василенко С., Бухлал Н. Розробка програмного забезпечення виявлення виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна і умовах несиметрії напруг. *Наука та виробництво*. 2020. № 23. С. 130-140. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990232020240697>.
- [22] Комп'ютерна програма «Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна»: опубл. 27.02.20.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF A FUNCTIONAL METHOD FOR DIAGNOSING THE TURN-TO-TURN SHORT CIRCUIT OF THE STATOR WINDINGS OF AN ELECTRIC MOTOR IN THE EVENT OF SUPPLY VOLTAGE ASYMMETRY

Prokopenko S.O.	postgraduate student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv;
Kryvonosov V.E.	D.Sc. (Engineering), professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8219-021X , e-mail: kryvonosov@nubip.edu.ua ;
Kryvonosov V.V.	postgraduate student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7083-7881 , e-mail: krivonosov.val05@gmail.com ;
Savenko O.S.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi State Technical University», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8108-2575 , e-mail: savenko_o_s@pstu.edu

The article addresses the urgent problem of improving the reliability of early detection of inter-turn short circuits in the stator windings of induction motors (IM) operating under dynamically changing and asymmetrical supply-voltage conditions. As induction motors constitute the majority of industrial electric drives, faults related to insulation degradation pose significant risks of unexpected shutdowns, equipment damage, and costly downtime. Statistical data indicate that more than 60% of IM failures are associated with insulation defects, with inter-turn short circuits being the most frequent and dangerous type due to their rapid development into phase-to-phase or ground faults. A comprehensive analysis of recent research highlights several groups of diagnostic methods: analytical modeling approaches, signal-processing techniques, machine-learning-based systems, and diagnostic methods rooted in symmetrical component analysis. Although each class of methods offers valuable diagnostic insights, most studies do not sufficiently account for dynamic variations in power-quality parameters – such as voltage unbalance, frequency fluctuations, and load changes – which

significantly influence the accuracy of fault detection. In particular, the inability of conventional functional diagnostics to maintain high sensitivity under non-stationary operating conditions limits their practical applicability for early fault identification. The article proposes a promising direction for developing a functional diagnostic method based on the combined use of instantaneous values of phase currents and voltages, estimated parameters of the motor equivalent circuit, and statistical processing of large datasets obtained under real operating conditions. A detailed research program is presented, including the determination of equivalent-circuit parameters, modeling changes in the number of winding turns, and studying functional dependencies between voltage asymmetry, load dynamics, and variations in diagnostic indicators. An experimental setup for generating and analyzing variable network conditions is described. The results demonstrate that integrating statistical analysis with functional diagnostic criteria significantly enhances the robustness of inter-turn short-circuit detection in the presence of voltage asymmetry and dynamic disturbances. The proposed approach provides a foundation for creating more sensitive and reliable online monitoring systems, ensuring timely fault identification and improving the operational safety and longevity of induction motors.

Keywords: turn-to-turn short circuit, functional diagnostics, diagnostic criteria, statistical analysis, equivalent circuit parameters of the electric motor.

References

- [1] I.V. Zhezhelenko, V.E. Kryvonosov, and B.F. Rybalko, "Ustroistvo dlia kontroliia y zashchyti elektrodvyhatelia ot nepolnofaznykh rezhymov y vytkovykh zamikanyii" ["Device for monitoring and protecting an electric motor from uneven phase conditions and turn-to-turn short circuits"], USSR Author's Certificate Appl. 1584028, Aug. 07, 1990. (Rus.)
- [2] V.E. Kryvonosov, O.H. Grib, S.V. Vasylenko, and V.V. Kryvonosov, "Sposib diahnostryky pochatkovoho momentu vytkovoho zamykannia v statornykh obmotkakh elektrodvyhuna" ["Method for diagnosing the initial moment of turn-locking in the stator windings of an electric motor"], UA Patent 124403, Sept. 08, 2021. (Ukr.)
- [3] N.J. Jameson, M.H. Azarian, and M. Pecht, "Improved electromagnetic coil insulation health monitoring using equivalent circuit model analysis," *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 119, article 105829, 2020. doi: **10.1016/j.ijepes.2020.105829**.
- [4] V. Nguyen, J. Seshadrinath, D. Wang, S. Nadarajan, and V. Vaiyapuri, "Model-based diagnosis and RUL estimation of induction machines under interturn fault," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, iss. 3, pp. 2690-2701, 2017. doi: **10.1109/TIA.2017.2669195**.
- [5] A.K. Babu, and J. Seshadrinath, "Interacting multiple model framework for incipient diagnosis of interturn faults in induction motors," *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, vol. 5, pp. 5120-5129, 2024. doi: **10.1109/TAI.2024.3405468**.
- [6] S. Ray, and D. Day, "Development of a comprehensive analytical model of an induction motor under conditions of stator interturn faults taking into account rotor slot harmonics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, iss. 2, pp. 2037-2047, 2023. doi: **10.1109/TIE.2022.3165294**.
- [7] C.J. Morales-Perez, D. Camarena-Martinez, J.P. Amezcuita-Sanchez, J.J. Rangel-Magdaleno, E.E. Sánchez Ramírez, and M. Valtierra-Rodríguez, "Early detection of inter-turn short circuits in induction motors using the derivative of stator current and a lightweight 1D-ResNet," *Computation*, vol. 13(6), article 140, 2025. doi: **10.3390/computation13060140**.
- [8] P.C.M. Lamim Filho, R. Pederiva, and J.N. Brito, "Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 42, iss. 1-2, pp. 377-387, 2014. doi: **10.1016/j.ymssp.2013.08.033**.
- [9] D. Wei, K. Liu, W. Hu, X. Peng, Y. Chen, and R. Ding, "Short-term fault feature extraction based on adaline for PMSM inter-turn short circuit diagnosis using residual insulation monitoring," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, pp. 3103-3114, 2023. doi: **10.1109/TIE.2022.3167164**.
- [10] M. Eftekhari, M. Moallem, S. Sadri, M.-F. Hsieh, "Online detection of induction motor's stator winding short-circuit faults," *IEEE Systems Journal*, vol. 8, iss. 4, pp. 1272-1282, 2014. doi: **10.1109/JSYST.2013.2288172**.
- [11] S. Ayas, and M.S. Ayas, "A novel bearing fault diagnosis method using deep residual learning network," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, iss. 2, pp. 22407-22423, 2022. doi: **10.1007/s11042-021-11617-1**.
- [12] L.S. Maraaba, A.S. Milhem, I.A. Nemer, H. Al-Duwaish, and M.A. Abido, "Convolutional neural network based inter-turn fault diagnosis in LSPMSMs," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 81960-81970, 2020. doi: **10.1109/ACCESS.2020.2991137**.
- [13] F.B. Abid, M. Sallem, and A. Brem, "Robust interpretable deep learning for intelligent fault diagnosis of induction motors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, iss. 6, pp. 3506-3515, 2019. doi: **10.1109/TIM.2019.2932162**.
- [14] F. Husari, and J. Seshadrinath, "Early stator fault detection and condition identification in induction motor using novel deep network," *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, vol. 3, iss. 5, pp. 809-818, 2022. doi: **10.1109/TAI.2021.3135799**.
- [15] Y. Fang, M. Wang, and L. Wei, "Deep transfer learning in inter-turn short circuit fault diagnosis of PMSM," in *Proceedings of the 2021 IEEE*

International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Takamatsu, Japan, Aug. 8-11, 2021, pp. 489-494. doi: **10.1109/ICMA52036.2021.9512785**.

- [16] M.U. Oner, I. Sahin, and O. Keysan, "Neural networks detect inter-turn short circuit faults using inverter switching statistics for a closed-loop controlled motor drive," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, iss. 4, pp. 2387-2395, 2023. doi: **10.1109/TEC.2023.3274052**.
- [17] G.M. Joksimovic, and J. Penman, "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, iss. 5, 2000. doi: **10.1109/41.873216**.
- [18] I.O. Zapparoli, L.M.R. Baccarini, P.C.M. Lamim Filho, and F.B. Batista, Transient envelope current analysis for inter-turn short-circuit detection in induction motor stator, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, article 97, 2020. doi: **10.1007/s40430-020-2188-7**.
- [19] M. Tomczyk, R. Mielnik, A. Plichta, I. Goldasz, and M. Sułowicz, "Identification of inter-turn short-circuits in induction motor stator winding using simulated annealing," *Energies*, vol. 15(1), article 17, 2022. doi: **10.3390/en15010117**.
- [20] G. Rajamany, S. Srinivasan, K. Rajamany, and R.K. Natarajan, "Induction motor stator interturn short circuit fault detection in accordance with line current sequence components using artificial neural network," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2019, article 4825787, 2019. doi: **10.1155/2019/4825787**.
- [21] V.E. Krivonosov, V.V. Vasilenko, and N.A. Bouhlal, "Rozrobka prohramnoho zabezpechennia vyivlennia vytkovoho zamykannia v statornykh obmotkakh elektrodvyhuna i umovakh nesymetrii napruh" ["Development of software for detecting an inter-turn fault in the stator windings of an electric motor under conditions of voltage asymmetry"], *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, № 23, pp. 130-140, 2020. doi: **10.31498/2522-9990232020240697**.
- [22] V.E. Kryvonosov, O.H. Hryb, I.T. Karpaliuk, V.V. Kryvonosov, A.O. Boriakin, and S.V. Vasylenko, "Prystrij diahnostyky nepovnofaznykh rezhymiv merezhi, strumovykh lantsiuhiv, pochatkovoho momentu vytkovoho zamykannia v statornykh obmotkakh i zakhystu elektrodvyhuna" ["Device for diagnosing incomplete phase modes of the network, current circuits, the initial moment of turn-on short circuit in stator windings and electric motor protection"]. 2020.

Стаття надійшла 12.08.2025

Стаття прийнята 30.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Перспективи розвитку функціонального методу діагностування виткового замикання статорних обмоток електродвигуна при несиметрії напруг живлення / Прокопенко С. О., Кривonosов В. С., Кривonosов В. В., Савенко О. С. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 141-149. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344830>.

144 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344889

МОДЕРНІЗАЦІЯ ТУРБОВІТРОДУВОК ТЕЦ: ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ЗАМІНИ КОМПРЕСОРА**Ялова А.М.**канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0926-542X>, e-mail: al.yalovaya@knu.edu.ua;**Бондар Н.В.**ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8713-265X>, e-mail: bondar_nv@knu.edu.ua

Мета дослідження. Метою дослідження є оцінка можливості заміни компресора для забезпечення подачі дуття з необхідними параметрами на доменну піч - 9, стабільної роботи доменної печі та гарантованого обсягу дуття на ДП-9 під час подальшої реконструкції повітродувки. **Матеріали і методи.** Для проведення дослідження були використані дані про існуючі параметри компресорної установки та її характеристики, зокрема параметри роботи компресора, які визначають необхідні умови для стабільної роботи системи дуття на ДП-9. У дослідженні було застосовано метод аналізу технічних характеристик компресорних установок: для порівняння різних моделей компресорів були зібрані технічні характеристики існуючого компресора та можливих кандидатів на заміну. Порівнювались параметри ефективності, потужності, енергоспоживання, а також вплив на стабільність роботи печі. Порівняння результатів до та після заміни – для оцінки впливу заміни компресора на систему в цілому використовувалися методи статистичного аналізу, що дозволило виявити зміни в енергоефективності, стабільності роботи та витратах на обслуговування установки. **Результати.** Наукова новизна дослідження полягає в розробці та впровадженні методики заміни компресора в компресорній установці для забезпечення стабільної роботи системи дуття на ДП-9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Вперше виявлено та обґрунтовано, що заміна компресора з урахуванням новітніх моделей дозволяє не лише оптимізувати параметри дуття, але й знизити енергоспоживання та підвищити ефективність роботи компресорної установки в умовах підвищених навантажень. Дослідження також включає комплексний аналіз впливу модернізації на систему проміжного охолодження та виявлення нових аспектів, що сприяють стабільності і довговічності роботи установки в умовах реконструкції. **Практичне значення.** Практичне значення дослідження полягає в розробці рекомендацій щодо заміни компресора в компресорних установках для забезпечення стабільної роботи системи дуття на ДП-9. Заміна компресора дозволяє значно підвищити енергоефективність процесу, зменшити енергоспоживання та знизити витрати на обслуговування обладнання. Впровадження запропонованих рішень дає змогу забезпечити безперебійну та стабільну роботу доменної печі, що важливо для підтримки високої продуктивності та якості продукції. Крім того, розроблені методи можуть бути використані для реконструкції та модернізації інших промислових установок, що дозволяє підвищити загальну ефективність виробничих процесів.

Ключові слова: компресорна установка, реконструкція, турбовітродувка, турбіна, теплоелектроцентрально.

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку характеризується стрімким зростанням вартості енергоресурсів, що зумовлює підвищену увагу до питань енергозбереження та енергоефективності в промисловій теплоенергетиці. Забезпечення раціонального використання енергоресурсів є актуальним завданням для будь-якого промислового підприємства, особливо для тих, що виробляють енергоємну продукцію. Однією з основних проблем сучасної та перспективної діяльності теплоенергетичного обладнання металургійних підприємств є швидке збільшення зносу обладнання, який вже досяг 60%, 52% обладнання теплоелектроцентралів відпрацювало від 30 до 50 років, а 7% – понад 50 років. Компресори в системі доменної печі забезпечують подачу стисненого повітря, необхідного для процесу горіння коксу та відновлення заліза. Вони сприяють досягненню високих температур у печі та ефективному протіканню хімічних реакцій. Зазначене зниження надійності роботи компресорних установок обумовлене високим зносом

основного обладнання та відсутністю необхідних інвестицій для їх масштабного та своєчасного оновлення. Стратегічними цілями розвитку компресорних систем є забезпечення надійності, ефективності та безпеки їх роботи. Актуальною проблемою на сьогодні є необхідність зниження виробничих витрат при забезпеченні стабільної та ефективної роботи доменної печі №9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». В умовах, коли робота здійснюється з противибуховими перепусками, виникає потреба в модернізації системи подачі дуття. Існуюче обладнання не забезпечує необхідну продуктивність, що ставить під загрозу досягнення запланованих показників виробництва чавуну на рівні 9000 тон на добу. Це зумовлює необхідність заміни застарілого компресора на новий, більш потужний агрегат, здатний забезпечити понад 9000 м³/хв дуття. У зв'язку з цим проблема заміни компресорного обладнання залишається актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У контексті підвищення енергоефективності металургійного виробництва важливою є проблема оптимізації роботи промислових компресорів, які забезпечують пневматичне обладнання, системи охолодження та інші технологічні процеси. Сучасні дослідження вказують на значний потенціал енергозбереження за рахунок модернізації компресорного обладнання, автоматизації його роботи та впровадження прогнозного технічного обслуговування, а також реконструкції та заміни застарілого обладнання.

Вітчизняні науковці приділяють увагу підвищенню ефективності експлуатації компресорів через реконструкцію існуючих систем. У статті Кравченко В.П. [1] розглядається підвищення ефективності та надійності систем подачі дуття в доменному виробництві, зокрема при використанні загальних колекторів для групи доменних печей. Увага приділяється математичному моделюванню процесів, що відбуваються в системах дуття, оптимізації режимів роботи турбокомпресорів, забезпеченню стабільного тиску та зниженню енерговитрат. Особливе значення має розробка моделей, здатних враховувати динамічну взаємодію між джерелами дуття та споживачами при змінних технологічних навантаженнях, що дозволяє підвищити техніко-економічну ефективність роботи доменних агрегатів.

У роботі Кошельнік О.В. [2] розглядається перспективна схема утилізації теплоти димових газів від регенеративних повітрянагрівачів доменних печей шляхом впровадження енерготехнологічного комплексу, ключовими елементами якого є турбоустановка з електрогенератором та термосорбційний компресор. Саме термосорбційний компресор забезпечує необхідні параметри робочого тіла перед подачею до турбіни, що дозволяє ефективно використовувати низькопотенційну теплоту. Дослідження підтвердили, що використання системи регенерації теплоти підвищують термодинамічну досконалість комплексу до 5%.

На міжнародному рівні спостерігається активне впровадження цифрових технологій у діагностику та обслуговування компресорів. У роботі Costa A. та ін. [3] описано використання гібридних моделей кластеризації для прогнозування технічного стану високонадірних компресорів. Запропоновані алгоритми дозволяють мінімізувати простой та знижують витрати на ремонт.

Крім того, у дослідженні Jakubowski J. та співавт. [4] наведено огляд сучасних методів штучного інтелекту, які застосовуються для управління компресорним обладнанням на підприємствах сталеливарної промисловості. Основна увага приділена методам обробки потокових даних із сенсорів, виявленню аномалій та оптимізації графіків обслуговування.

Також дослідження [5] присвячене підвищенню енергоефективності багатоступеневих компресорних систем шляхом врахування реальної (змінної)

ефективності теплообмінників при охолодженні між ступенями. Автори розробили математичну модель, яка враховує вплив температури довкілля на ефективність інтеркулера, і довели, що традиційні підходи з фіксованими коефіцієнтами можуть призводити до завищених енергетичних витрат.

У дослідженні [6] розглянуто модель оптимального проектування багатоступеневого компресора зі сталою геометрією проточного тракту, а у дослідженні [7] увагу приділяють турбокомпресорам зі змінною геометрією як засіб підвищення ефективності наддуву та рекуперації енергії вихлопних газів.

Дослідження [8, 9] присвячені оптимізації конструкції сильно навантаженого осьового компресора за допомогою аеродинамічного моделювання та генетичних алгоритмів. У дослідженні використано параметричне представлення лопатей за допомогою Bézier-кривих для досягнення мінімального рівня втрат і підвищення стабільності потоку при високих навантаженнях. Результати показали, що запропонований метод дозволяє істотно знизити втрати потоку та покращити стійкість компресора до зсувів режимів роботи, що є ключовим для високопродуктивних газотурбінних установок. А у дослідженні [10] розглянуто підхід до попередньої оптимізації багатоступеневих осьових промислових компресорів із застосуванням принципів, запозичених із практики проектування авіаційних компресорів. Такий підхід передбачає використання емпіричних залежностей, характерних для авіаційної галузі, зокрема оптимальні значення відношення товщини до хорди, ступеня завантаження, кута атаки та геометричних співвідношень лопаток. У [11] встановлено залежність між варіаціями кута нахилу лопатки ротора, що виникають унаслідок деформацій профілю лопатки компресора, та змїною величини потужності, необхідної для його роботи.

У роботах [12, 13] запропоновано застосування нелінійного керування для відцентрових компресорів з урахуванням промислових вимог, зокрема адаптації до змін навантаження та дотримання обмежень, таких як запобігання помпажу та діагностика несправностей у прогнозованому обслуговуванні. Модифіковано модель Гравдаля-Егеланна для точнішого відображення реальних умов, а також реалізовано керування вихідною потужністю на основі внутрішньої моделі у поєднанні з MIN/MAX-регулюванням. Додатково проаналізовано стійкість системи та ефективність перемикавання режимів, а ефективність підходу продемонстровано на прикладі керування тиском, захисту від помпажу та обмеження максимального тиску.

Отже, аналіз сучасних джерел показує, що напрямок удосконалення промислових компресорів на металургійних підприємствах є актуальним як для вітчизняної, так і для зарубіжної науки. Перевага надається комплексному підходу, що охоплює технічну модернізацію, автоматизацію та інтеграцію інтелектуальних систем управління.

Мета статті

Метою даної роботи є дослідження та оцінка можливості заміни компресора для забезпечення подачі дуття з необхідними параметрами на доменну піч - 9, стабільної роботи доменної печі та гарантованого обсягу дуття на ДП-9 під час подальшої реконструкції повітродувки.

Виклад основного матеріалу

Згідно з даними Офісу з розвитку підприємництва та експорту [14], у 2021 році металургійна продукція залишалася основною статтею експорту України. Обсяг експорту чорних металів та виробів з них досяг 15,98 млрд доларів США, що на 77% перевищує показник 2020 року. За підсумками 2021 року, виробництво сталі в Україні зросло на 3,3% порівняно з попереднім роком, досягнувши 21,3 млн тонн. Виплавка чавуну також збільшилася на 3,3%, склавши 21,1 млн тонн, а виробництво металопродукції зросло на 3,3%, до 19,04 млн тонн. У січні-листопаді 2021 року Україна посіла 10-те місце у світовому рейтингу виробників чавуну, виплавивши 19,44 млн тонн, що на 4,5% більше, ніж за аналогічний період 2020 року. У виробництві сталі Україна зайняла 14-те місце, виплавивши 19,62 млн тонн, що на 4,9% перевищує показник січня-листопада 2020 року. Виробництво чавуну та сталі є надзвичайно енергоємними процесами, які спричиняють 7-9% прямих викидів CO₂ від глобального використання викопного палива. За даними Міжнародного енергетичного агентства, серед важких промислових галузей виробництво чавуну та сталі є другим за величиною споживачем енергії. Хоча енергоспоживання на виробництво однієї тонни сталі знизилося за останні 50 років на 60%, повністю уникнути енергоспоживання неможливо і шляхів розвитку залишається досить багато. Отже, для зменшення споживання енергії у металургійній галузі необхідно впроваджувати цілеспрямовані заходи з підвищення енергоефективності та покращення роботи технологічного обладнання. У 2020 року Міжнародна енергетична агенція (МЕА) оприлюднила дорожню карту для пріоритетних технологій виробництва чавуну та сталі [15]. У цьому звіті визначено технології та стратегії, необхідні для металургійної галузі, щоб забезпечити її розвиток у рамках більш загального бачення МЕА щодо сталого енергетичного прогресу. У звіті аналізується потенціал підвищення енергоефективності, включаючи збільшення використання вторинних енергоресурсів та зменшення енергоспоживання. МЕА підкреслює важливість сталі для економіки. Хоча підвищення енергоефективності є важливим кроком для галузі, необхідно також активно розвивати і впроваджувати широкий спектр інноваційних технологій та інфраструктури.

Компресорне обладнання є одним із ключових елементів промислової інфраструктури металургійного виробництва. Воно забезпечує стиснене повітря для пневматичних систем, енергопостачання агрегатів,

охолодження та інші технологічні процеси. У зв'язку з високим енергоспоживанням і навантаженням на систему електропостачання, актуальним є питання модернізації застарілих компресорів та впровадження енергоефективних технологій. Металургійні підприємства України мають поодинокі практику заміни компресорного обладнання. У 2020 році у компресорній ЦТК-2 теплосилового цеху ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат» експлуатувалися два турбокомпресори К-500 продуктивністю по 500 м³/хв кожен. Обладнання використовувалося для виробництва стисненого повітря та подачі його в загальнозаводську мережу для підтримки системного тиску. Відцентрові компресори, спроектовані ще в 60-х роках минулого століття, значно поступаються енергоефективності сучасного обладнання. Висока питома споживана потужність і відсутність системи регулювання продуктивності призводили до нераціонального споживання електроенергії теплосиловим цехом. Для подачі в пневмомережу підприємства аналогічного обсягу стисненого повітря фахівці ТОВ «Далгакиран компресор Україна» запропонували використовувати три відцентрових компресора TRX-170/1700 виробництва ІНІ-DALGAKIRAN (Японія-Туреччина). Поставлені турбокомпресори з продуктивністю 345 м³/хв кожен сумарно споживають 5100 кВт електроенергії, що на 20% менше споживання старим компресорним обладнанням.

У 2018 році ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» уклало контракт на постачання повітродувки Siemens STC-GV (160-3) для обслуговування доменної печі №9, найбільшої на підприємстві. Загальна вартість угоди перевищила 13 млн доларів США. Введення в експлуатацію нової повітродувки з електроприводом (ЕВД-1) мало на меті збільшити обсяги виробництва чавуну на доменній печі №9 та зменшити викиди CO₂ на 30,5 тис. тонн на рік, завдяки економії природного газу. Нове обладнання забезпечило стабільну подачу холодного дуття з ТЕЦ-3 підприємства. Проект передбачав співпрацю з німецьким та українським підрозділами компанії Siemens. Згідно з умовами угоди, компресор ЕВД-1 був поставлений німецьким представництвом Siemens, а електродвигун та систему плавного пуску – «Сіменс Україна». Продуктивність обладнання становила 4 800 м³/хв, а номінальна потужність електродвигуна – 26,5 МВт. Термін постачання обладнання був запланований на квітень 2019 року. На той час у ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» експлуатувалися десять турбоповітродувки: сім обслуговували доменні печі доменного цеху №1, а три – доменного цеху №2. Обладнання, що обслуговувало доменну піч №9, складалося з трьох турбоповітродувки (ТВД-12, 13, 14). Одна з цих турбоповітродувки була замінена на нову з електроприводом, а в подальшому планувалося модернізація інших. Для зниження витрат виробництва в режимах, що передбачають протитисковий перепад, була передбачена схема з підключенням до подачі дуття додаткової повітродувки ТК-15. З цією метою передбачається

заміна компресора К-3000-61-1 ТК-15 на компресор К-5500-42-1 ТВД-3А, продуктивністю 4 200 м³/хв. Планована продуктивність ДП-9 у перспективі становила 9 000 тонн чавуну на добу, що повинно було забезпечуватися більш ніж 9 000 м³/хв дуття. Річна виробка дуття становитиме 2016000 тон·нм³. Річна потреба в парі становить 514400 тон, в кисні 380000 тон·нм³, у воді: зворотній цикл на охолодження ТК-15 – 44640 тис.м³, підживлення оборотного циклу ТК-15 – 232,2 тис.м³.

Турбоповітродувка ТК-15 розташована в турбінному цеху №3 головного корпусу ТЕЦ-3 і знаходиться на території металургійного підприємства ПАТ

«АрселорМіттал Кривий Ріг». Турбоповітродувка ТК-15 (компресор К-3000-61-1 та парова турбіна ВКВ-22-1) виготовлена у 1982 році (заводський №6723). Об'єкт перебуває на балансі ТЕЦ-3 і обслуговується персоналом турбінного цеху ТЕЦ-3. Метою заміни обладнання ТК-15 є зниження витрат виробництва та експлуатація компресорів в режимах без помпажу, а також запобігання ризикам, пов'язаним з можливим виходом з ладу ТВД ТЕЦ-3 та зупинкою ДП-9 у разі відключення ТЕЦ-3.

Парова турбіна ВКВ-22-1 є типовим представником парових турбін промислового призначення.

Таблиця 1

Технічні характеристики парової турбіни ВКВ-22-1

№	Найменування величини	Одиниці виміру	Значення величин		
			Режим 1	Режим 2	Режим макс.
1	Потужність на муфті	кВт	15000	17200	20500
2	Частота обертання	с ⁻¹ (об/хв)	55 (3300)	57,3 (3440)	58,3 (3500)
3	Витрати свіжої пари (при увімкнених ПНД)	кг/с (т/год)	15,7 (56,5)	17,7 (64,3)	21,1 (76,0)
4	Температура підігріву конденсату в ПНД	°C	148	152	157
5	Температура охолоджувальної води при вході в конденсатор	°C	25	25	25
6	Кількість охолоджувальної води	м ³ /с (м ³ /год)	251,36 (4900)	251,36 (4900)	251,36 (4900)

Турбінний цех ТЕЦ-3 призначений для забезпечення холодним дуттям доменної печі №9 і є єдиним технологічним комплексом, що складається з:

- ТВД №12, 13, 14 з компресорами К-7000, проектною продуктивністю 5500 нм³/хв кожна (встановлені в 1974-75 роках);

- ТК-15 з компресором К-3000, продуктивністю 3000 нм³/хв та турбіною ВКВ-22 (встановлена в 1982 році);

- система інженерних комунікацій, автоматичного управління, траси енергетичних носіїв (циркуляційні водоводи, кисневі трубопроводи, маслопроводи), системи АСУТП, протипожежної, охоронної та інших сигналізацій.

На даний час ТВД №12, 13, 14 перебувають в експлуатації, проте їх стан оцінюється як надзвичайно незадовільний. Обстеження цих повітродувок показали, що стінки цих агрегатів мають значний знос, також є тріщини в сопловій коробці, механічні пошкодження, руйнування лопатей, значна корозія на дисках та інше.

Фактична продуктивність значно знижена з 5500 нм³/хв до 4600 нм³/хв.

Повітродувка ТК-15 введена в експлуатацію в 1982 році та розрахована на проектну продуктивність 3000 нм³/хв. Спочатку ця повітродувка була встановлена для забезпечення стисненим повітрям кисневого блоку КТ-70, де були необхідні параметри подачі повітря, що відрізняються від параметрів дуття на ДП-9. Пізніше, після закриття блоку, необхідність у використанні цієї повітродувки для подачі стисненого повітря на кисневе виробництво відпала, і вона була перепідключена до подачі дуття на ДП-9.

Агрегат не подає дуття на ДП-9 і перебуває в резерві через несумісність необхідних параметрів дуття для ДП-9 та параметрів компресора К-3000 цієї повітродувки (робочий тиск 6 кгс/см², при необхідному - 4,2 кгс/см²).

Для забезпечення необхідного витрату дуття, паралельно експлуатуються два компресори залежно від кліматичних умов та режиму роботи печі №9.

Введення в експлуатацію повітродувки ТК-15 після заміни компресора дозволить подавати дуття з необхідними параметрами на ДП-9, забезпечити стабільну роботу печі, а також забезпечити необхідний обсяг дуття на ДП-9 під час подальшої реконструкції ТВД №12, 13, 14. Для кількісної оцінки надійності енергетичного обладнання застосовуються як окремі, так і інтегральні показники. Окремі показники надійності характеризують специфічні властивості технічного стану обладнання і зазвичай включають такі параметри, як інтенсивність відмов, середній час напрацювання на відмову, а також середній час відновлення. Інтегральні показники охоплюють сукупність характеристик надійності та застосовуються для комплексної оцінки технічного стану обладнання. До таких показників відносяться коефіцієнти готовності, технічного

використання, непланових відмов, а також коефіцієнти використання встановленої потужності.

Для практичного обчислення цих показників в межах одного календарного року фіксуються такі експлуатаційні дані, як сумарний час напрацювання обладнання, тривалість його перебування в ремонті, а також періоди вимушених простоїв. На основі цих даних проводиться відповідний розрахунок, що дозволяє оцінити ефективність роботи і надійність компресорного обладнання на ТЕЦ.

У складі ТК №15 після заміни передбачені компресор типу К-5500-42-1 та привідна парова турбіна типу ВКВ-22, що працює в конденсаційному режимі та забезпечує подачу дуття (збагаченого киснем) на ДП-9 (рис. 1).

Схема турбоповітродувки ТК №15

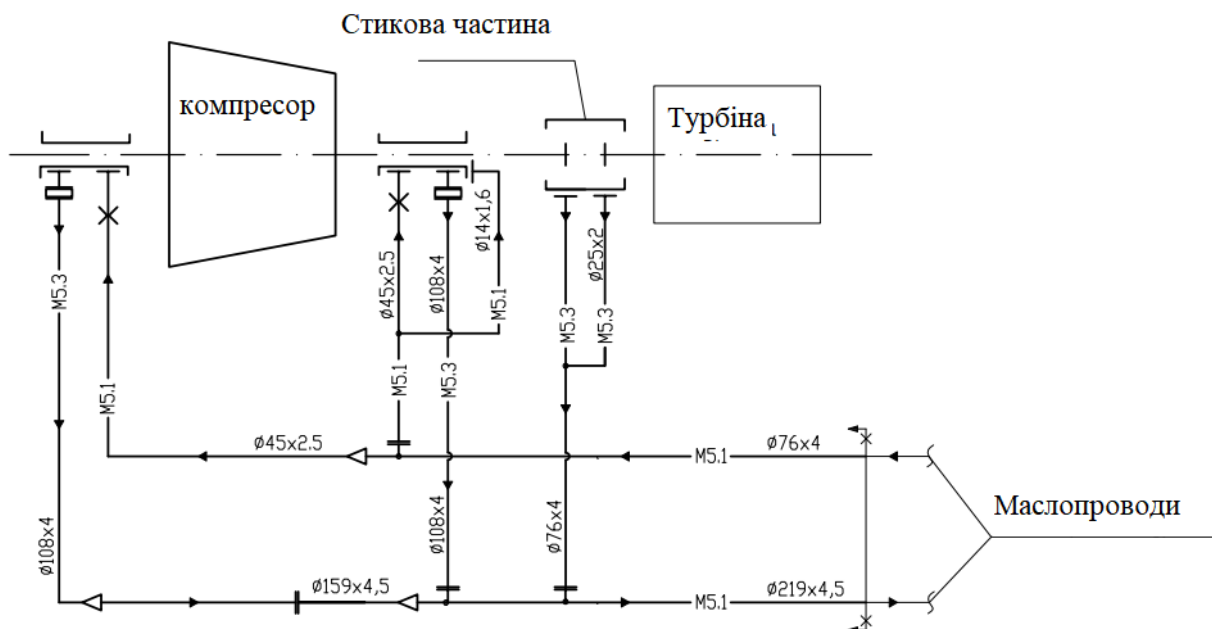


Рис. 1 – Схема ТК №15

Запропонований до встановлення комплект теплоенергетичного обладнання складається з компресора, проміжного повітроохолоджувача, водяний фільтр (грязьовик). Компресор типу К-5500-42-1 виконаний відцентрового типу одноциліндровим.

Будова компресора має з чотири ступені стиснення, розподілених на дві секції низького та високого тиску, які розділені повітроохолоджувачем. У першій секції обидві ступені стиснення виконані двопоточними, у другій секції – однопоточними. Технічна характеристика компресора К-5500-42-1 наведена в таблиці 2. Проміжний повітроохолоджувач типу ВОТ-2000 є поверхневим з ребристими трубками, призначений для

зниження температури повітря перед другою секцією стиснення компресора з метою підвищення економічності агрегату. На лінії подачі циркуляційної води до проміжного повітроохолоджувача встановлений вертикальний водяний фільтр (грязьовик) Ду 350, призначений для очищення води від забруднень.

Під час проведення аналізу з питання заміни компресора на більш потужний було враховано ключові показники ефективності та надійності (енергетичні витрати, здатність нового компресора до забезпечення необхідних параметрів тиску і потужності, а також економічні та технічні показники).

Таблиця 2

Технічна характеристика компресора К-5500-42-1

№	Найменування величини	Одиниці виміру	Значення величин	
			Режим 1	Режим 2
1	Продуктивність, віднесена до 20°C та 0,1013 МПа (760 мм.рт.ст.)	м³/с (м³/хв)	61 (3660)	70 (4200)
2	Об'ємна продуктивність при початкових умовах	м³/с (м³/хв)	63 (3780)	72,5 (4350)
3	Кінцевий тиск	МПа (кгс/см²)	0,412 (4,2)	0,412 (4,2)
4	Потужність	кВт	15000	17200
5	Частота обертання ротора	с⁻¹	55 (3300)	57,3 (3440)
6	Початкові умови стану повітря при вході до компресора: - Тиск, абсолютний; - Температура; - Відносна вологість.	МПа (кгс/см²) °C %	0,098 (1,0) 20 50	0,098 (1,0) 20 50
7	Температура охолоджувальної води при вході в охолоджувач повітря	°C	25	25
8	Витрата охолоджувальної води на проміжний охолоджувач повітря	м³/с (м³/год)	0,167 (600)	0,167 (600)

Коефіцієнт ефективності компресора (КЕ). Цей показник визначає, як ефективно компресор перетворює споживану електричну енергію в механічну енергію.

$$KE = \frac{P_{\text{спож}}}{P_{\text{пер}}} \quad (1)$$

де $P_{\text{пер}}$ – потужність, передана в стиснуте повітря (кВт),

$P_{\text{спож}}$ – потужність, спожита компресором (кВт).

Специфічна витрата енергії (СВЕ). Цей показник дозволяє оцінити енергетичні витрати на одиницю стиснутого повітря, що виробляється компресором.

$$CBE = \frac{P_{\text{спож}}}{V_{\text{потік}}}, \quad (2)$$

$V_{\text{потік}}$ – об'єм стиснутого повітря, що подається компресором (м³/год).

Коефіцієнт використання потужності (КВП). Цей коефіцієнт показує наскільки ефективно використовується встановлена потужність компресора.

$$KBP = \frac{P_{\text{спр}}}{P_{\text{макс}}}, \quad (3)$$

де $P_{\text{спр}}$ – фактична потужність, що використовується для роботи (кВт),

$P_{\text{макс}}$ – максимальна потужність компресора (кВт).

Індекс надійності компресора (ІН). Індекс надійності дозволяє оцінити надійність компресора в процесі експлуатації та передбачити можливі непередбачувані відмови або необхідність в ремонтах.

$$IN = \frac{T_{\text{б.р.}}}{T_{\text{рем}}}, \quad (4)$$

де $T_{\text{б.р.}}$ – час безвідмовної роботи компресора,

$T_{\text{рем}}$ – час, що витрачається на ремонт.

Витрати на технічне обслуговування (ТО). При порівнянні старого компресора з новим важливо врахувати витрати на його обслуговування. Це може включати витрати на планові та аварійні ремонти, заміну деталей тощо.

$$TO = C_{\text{рем}} + C_{\text{з.ч.}} + C_{\text{перс}}, \quad (5)$$

де $C_{\text{рем}}$ – витрати на поточні ремонти (грн/рік),

$C_{\text{з.ч.}}$ – витрати на запасні частини (грн/рік),

$C_{\text{перс}}$ – витрати на обслуговуючий персонал (грн/рік).

Нова потужність компресора для доменного виробництва. Для вибору нового компресора важливо врахувати потреби в стиснутому повітрі для доменного виробництва, які часто вимірюються в кубічних метрах за годину (м³/год).

$$V_n = V_{\text{ст}} \cdot \frac{P_n}{P_{\text{ст}}}, \quad (6)$$

де V_n – об'єм стиснутого повітря, що потрібен від нового компресора (м³/год),

P_n – потужність нового компресора (кВт),

$P_{\text{ст}}$ – потужність старого компресора (кВт).

На існуючому турбокомпресорі ст. №15 К-3000-61-1, встановленому на ТЕЦ-ПВС №3 ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг», в якості приводу використовується парова турбіна ВКВ-22-1. В якості приводу встановлюваного компресора К-5500-42-1 використовується цей же тип парової турбіни. Основними проектними рішеннями передбачено виготовлення проміжного валу для з'єднання існуючої парової турбіни з встановлюваним компресором. Також передбачені з'єднання системи маслопостачання компресора з існуючою системою маслопостачання парової турбіни.

Для встановлення компресора К-5500-42-1 використовується існуючий фундамент турбокомпресора ст. №15.

Для забезпечення охолодження конденсатора турбіни, маслоохолоджувачів та повітроохолоджувача ВОТ-2000 передбачаються демонтаж існуючих циркуляційних насосів Д-6300-27 та монтаж подаючих і скидаючих водоводів на ТК-15 від загальних подаючих і скидаючих колекторів циркуляційної води ТЕЦ-3. Для

забезпечення стабільної роботи компресора передбачена система протипомпажного регулювання і захисту.

Турбокомпресор К-5500-42-1, відповідно до своїх технічних характеристик, може забезпечити кількість повітря на дуття при роботі в парі з одним з існуючих турбокомпресорів ст.№12, 13, 14 як у номінальному,

так і в максимальному режимі. Крім того, установка зазначеного компресора дозволить знизити, при необхідності, виробництво дуття до 6000 нм³/хв без організації протипомпажного перепуску на компресорі К-7000-41-1. В таблицях 3-4 наведено параметри компресора до та після модернізації.

Таблиця 3

Параметри компресора до модернізації

Найменування		Розмірність	Величина	
			Режим роботи	
			номінальний	максимальний.
1	Продуктивність віднесена до 20 °С та 101 кПа (1,033 кгс/см²)	нм³/с (нм³/хв)	50 (3000)	55 (3300)
2	Об'ємна продуктивність за початкових умов	нм³/с (нм³/хв)	53,3 (3200)	58,3 (3500)
3	Кінцевий тиск	МПа (кгс/см²)	0,56 (5,6)	0,61 (6,1)
4	Споживана потужність	кВт	14250	17000
5	Початковий тиск повітря при вході у всмоктувальний патрубок	кПа (кгс/см²)	-3 (-0,03)	-3 (-0,03)
6	Початкова температура повітря	°С	20	20
7	Відносна вологість	%	50	50
8	Температура охолоджувальної води при вході в проміжні та кінцеві охолоджувачі повітря	°С	25	25
9	Витрата охолоджувальної води на два проміжні повітроохолоджувачі	м³/с (м³/год)	0,28 (1000)	0,28 (1000)
10	Частота обертання ротора компресора	с ⁻¹ (об/хв)	54,3 (3260)	56,7 (3400)

Таблиця 4

Параметри компресора після модернізації

Найменування		Розмірність	Величина	
			Режим 1	Режим 2
1	Продуктивність масова	кг/с (кг/хв)	73,1 (4388)	84,2 (5050)
2	Об'ємна продуктивність за початкових умов	м³/с (м³/хв)	63,0 (3780)	72,5 (4350)
3	Кінцевий тиск	МПа (кгс/см²)	0,41 (4,2)	0,41 (4,2)
4	Споживана потужність	кВт	15000	17200
5	Частота обертання ротора	с ⁻¹ (об/хв)	55 (3300)	57,3 (3440)
6	Початкові умови стану повітря при вході в компресор: - тиск, абсолютний; - температура; - відносна вологість	кПа (кгс/см²) °C %	98 (1,0) 20 50	98 (1,0) 20 50
7	Температура охолоджувальної води при вході в охолоджувач повітря	°C	25	25
8	Витрата охолоджувальної води на проміжний охолоджувач повітря	м³/с (м³/год)	0,167 (600)	0,167 (600)

Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття до введення в експлуатацію модернізованого агрегату – 0,2149-0,2475 Гкал/тис. нм³.

Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття після введення в експлуатацію модернізованого агрегату – 0,1761 Гкал/тис. нм³.

Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття на турбокомпресорах такого ж типу у ТЕЦ-2 – 0,1834 Гкал/тис. нм³.

Установлюваний агрегат, як за своїми характеристиками, так і за аеродинамічним розрахунком всмоктувального та нагнітального трактів, забезпечує тиск у станційному повітроводі для доменної печі №9 – 4,2 кгс/см² при номінальних та максимальних навантаженнях.

Висновки

У ході проведеного дослідження та розрахунків було виявлено, що заміна старих компресорів на нові більш ефективні моделі забезпечує не лише зниження енергоспоживання, але й покращує надійність енергетичних систем. Використання нових компресорів дозволяє оптимізувати витрати на енергію, знижуючи операційні витрати та забезпечуючи стабільну роботу металургійних підприємств. Заміну старого компресора К-3000 на новий К-5500-42-1 слід розглядати як ефективний крок для підвищення надійності та енергоефективності системи подачі стисненого повітря на доменну піч №9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Новий компресор здатний забезпечити необхідні параметри дуття, що значно підвищить стабільність роботи печі та зменшить ризики, пов'язані з можливими аваріями. Згідно з технічними даними, компресор має продуктивність від 3660 м³/хв до 4200 м³/хв при максимальному робочому тиску 4,2 кгс/см². Це дає можливість забезпечити стабільну подачу дуття в необхідних обсягах для підтримки ефективної роботи доменної печі. Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття до введення в експлуатацію модернізованого агрегату – 0,2149-0,2475 Гкал/тис. нм³. Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття після введення в експлуатацію модернізованого агрегату – 0,1761 Гкал/тис.нм³. Встановлення компресора К-5500-42-1 дозволить знизити ймовірність аварійних зупинок, пов'язаних з відмовами старих агрегатів, таких як компресор К-3000. Це також зменшить періоди вимушених простоїв та поліпшить загальну ефективність роботи виробничих процесів на підприємстві. Використання нових компресорів та повітродувок дозволяє створити більш стабільну та ефективну енергетичну систему в рамках металургійного виробництва, що є важливим для підтримки надійного енергопостачання на підприємствах з високою енергоемністю. Отже, модернізація компресорного обладнання на базі компресора К-5500-42-1 є важливим кроком для підвищення енергоефективності, зниження викидів та забезпечення стабільної роботи доменних печей на підприємствах металургійної галузі.

Перелік використаних джерел

[1] Кравченко В. П. Математичне моделювання системи забезпечення дуттям групи доменних печей через загальний колектор. *Вісник Приазовського*

Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. 2016. Вип. 32. С. 188-197.

- [2] Кошельнік О. В. Інтеграція водневих енергоперетворюючих систем в теплотехнологічні схеми доменного виробництва. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2013): тези доп. 21-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 29-31 травня 2013 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. Ч. 1. С. 294.*
- [3] Predictive Maintenance Study for High-Pressure Industrial Compressors: Hybrid Clustering Models / A. Costa et al. *Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, USA, 7-10 January 2025. Pp. 992-1001. DOI: <http://dx.doi.org/10.24251/HICSS.2025.118>.
- [4] Artificial Intelligence Approaches for Predictive Maintenance in the Steel Industry: A Survey / J. Jakubowski et al. arXiv preprint. arXiv:2405.12785. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2405.12785>.
- [5] Azizifar S., Banooni S. Modeling and optimization of industrial multistage compressed air system using actual variable effectiveness in hot regions. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 8(5). DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814016647231>.
- [6] Design efficiency optimization of one-dimensional multi-stage axial-flow compressor / Chen L., Luo J., Sun F., Wu C. *Applied Energy*. 2008. Vol. 85, iss. 7. Pp. 625-633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.10.003>.
- [7] Feneley A. J., Pesiridis A., Mahmoudzadeh Andwari A. Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting-A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 71. Pp. 959-975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.125>.
- [8] Optimization Design of a 2.5 Stage Highly Loaded Axial Compressor with a Bezier Surface Modeling Method / S. Huang et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(11). Article 3860. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10113860>.
- [9] The Use of Sweep and Dihedral in Multistage Axial Flow Compressor Blading-Part I: University Research and Methods Development / S.J. Gallimore et al. *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, Amsterdam, The Netherlands, 3-6 June 2002. Pp. 33-47. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2002-30328>.
- [10] Lei F., Zhang C. Preliminary Optimization of Multi-Stage Axial-Flow Industrial Process Compressors Using Aero-Engine Compressor Design Strategy. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(19). Article 9248. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199248>.
- [11] Rotor-blades' profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness / Lebele-Alawa B.T., Hart H.I., Ogaji S.O.T., Probert S.D. *Applied Energy*. 2008. Vol. 85, iss. 6. Pp. 494-505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.12.001>.

- [12] Schulze R., Richter H. Model based MIN/MAX override control of centrifugal compressor systems. *Franklin Open*. 2024. Vol. 7. Article 100084. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fraope.2024.100084>.
- [13] El Hairech O., Lyhyaoui A. Fault detection and diagnosis in condition-based predictive maintenance. *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development*, Ensam Rabat, Morocco, 22-27 May 2022. Pp. 296-301. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35251-5_28.
- [14] Найвищий обсяг експорту України у 2021 році має продукція металургії та аграрного сектору. URL: [https://me.gov.ua/News/Detail/a6910472-e124-4ce2-ba27-858bc3310932?lang=uk-UA&title=V2021-RotsiUkrainskiEkspoteriPokazaliNaibilshiPokaznik](https://me.gov.ua/News/Detail/a6910472-e124-4ce2-ba27-858bc3310932?lang=uk-UA&title=V2021-RotsiUkrainskiEkspoteriPokazaliNaibilshiPokaznikiZProdazhuZaKordonMetalivTaRoslinnoiProduktsii) (дата звернення: 06.01.2025).
- [15] International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap, October 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (дата звернення: 25.10.2024).

MODERNIZATION OF CHP TURBO BLOWERS: TECHNICAL ASPECTS OF COMPRESSOR REPLACEMENT

Yalova A.

PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0926-542X>, e-mail: al.yalovaya@knu.edu.ua;

Bondar N.

senior lecturer, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8713-265X>, e-mail: bondar_nv@knu.edu.ua

Purpose of the study. The objective of this study is to assess the feasibility of replacing the compressor to ensure the delivery of blast air with the required parameters to Blast Furnace No. 9 (BF-9), maintain stable furnace operation, and guarantee the necessary blast volume during the subsequent reconstruction of the blower system. **Materials and Methods.** The study utilized data on the existing parameters and characteristics of the compressor unit, particularly the compressor's operating parameters that determine the required conditions for the stable operation of the blast system at BF-9. The method of technical analysis of compressor units was applied: to compare various compressor models, technical specifications of the current compressor and potential replacement candidates were collected. Parameters such as efficiency, power, energy consumption, and their impact on furnace stability were compared. Statistical analysis methods were used to assess system performance before and after the compressor replacement, enabling the evaluation of changes in energy efficiency, operational stability, and maintenance costs. **Results.** The scientific novelty of the research lies in the development and implementation of a methodology for compressor replacement in the compressor unit to ensure the stable operation of the blast system for BF-9 PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih». It was established and justified for the first time that replacing the compressor with a modern model not only optimizes blast parameters but also reduces energy consumption and increases the overall efficiency of the compressor unit under increased load conditions. The study also includes a comprehensive analysis of the impact of modernization on the intercooling system and identifies new factors contributing to the long-term stability and reliability of the unit during reconstruction. **Practical Significance.** The practical significance of this study lies in the development of recommendations for compressor replacement in compressor units to ensure stable operation of the blast system at BF-9. Compressor replacement significantly improves energy efficiency, reduces energy consumption, and lowers maintenance costs. The implementation of the proposed solutions ensures uninterrupted and stable operation of the blast furnace, which is crucial for maintaining high productivity and product quality. Moreover, the developed methods can be applied to the reconstruction and modernization of other industrial units, enhancing the overall efficiency of production processes.

Keywords: compressor unit, reconstruction, turbo blower, turbine, combined heat and power plant (CHP).

References

- [1] V.P. Kravchenko, «Matematychnе modeliuвання system zabezpechennia duttiam hrupy domennykh pechei cherez zahalnyi kolektor» [«Mathematical modelling of the systems providing groups of blastfurnaces with blast via a common manifold»], *Visnyk Pryazovs'koho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovsky State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 32, pp. 188-197, 2016. (Ukr.)
- [2] O.V. Koshelnik, «Intehratsiia vodnykh enerhopretvoriuiuchykh system v teplotekhnolohichni skhemy domennoho vyrobnytstva» [«Integration of water-based energy conversion systems into heat technology schemes of blast furnace generation»], in *Proc. of the 21-st Int. Sci.-Pract. Conf. «Information technologies: science, technology, technology, lighting, health» (MicroCAD-2013)*, Kharkiv, Ukraine, May 29-31, 2013, vol. 1, pp. 294. (Ukr.)

- [3] A. Costa, E. Mastriani, F. Incardona, K. Munari, and S. Spinello, «Predictive Maintenance Study for High-Pressure Industrial Compressors: Hybrid Clustering Models», in *Proc. of the Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, USA, Jan. 7-10, 2025, pp. 992-1001. **doi: 10.24251/HICSS.2025.118.**
- [4] J. Jakubowski et al., «Artificial Intelligence Approaches for Predictive Maintenance in the Steel Industry: A Survey», 2024, *arXiv: 2405.12785*. **doi: 10.48550/arXiv.2405.12785.**
- [5] S. Azizifar, and S. Banooni, «Modeling and optimization of industrial multistage compressed air system using actual variable effectiveness in hot regions», *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8(5), 2016. **doi: 10.1177/1687814016647231.**
- [6] L. Chen, J. Luo, F. Sun, and C. Wu, «Design efficiency optimization of one-dimensional multi-stage axial-flow compressor», *Applied Energy*, vol. 85, iss. 7, pp. 625-633, 2008. **doi: 10.1016/j.apenergy.2007.10.003.**
- [7] A.J. Feneley, A. Pesiridis, and A. Mahmoudzadeh Andwari, «Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting-A Review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 959-975, 2017. **doi: 10.1016/j.rser.2016.12.125.**
- [8] S. Huang, J. Cheng, C. Yang, C. Zhou, S. Zhao, and X. Lu, «Optimization Design of a 2.5 Stage Highly Loaded Axial Compressor with a Bezier Surface Modeling Method», *Applied Sciences*, vol. 10(11), article 3860, 2020. **doi: 10.3390/app10113860.**
- [9] S.J. Gallimore, J.J. Bolger, N.A. Cumpsty, M.J. Taylor, P.I. Wright, and J.M.M. Place, «The Use of Sweep and Dihedral in Multistage Axial Flow Compressor Blading-Part I: University Research and Methods Development», in *Proc. of the ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, Amsterdam, The Netherlands, June 3-6, 2002, pp. 33-47. **doi: 10.1115/GT2002-30328.**
- [10] F. Lei, and C. Zhang, «Preliminary Optimization of Multi-Stage Axial-Flow Industrial Process Compressors Using Aero-Engine Compressor Design Strategy», *Applied Sciences*, vol. 11(19), article 9248, 2021. **doi: 10.3390/app11199248.**
- [11] B.T. Lebele-Alawa, H.I. Hart, S.O.T. Ogaji, and S.D. Probert, «Rotor-blades' profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness», *Applied Energy*, vol. 85, iss. 6, pp. 494-505, 2008. **doi: 10.1016/j.apenergy.2007.12.001.**
- [12] R. Schulze, and H. Richter, «Model based MIN/MAX override control of centrifugal compressor systems», *Franklin Open*, vol. 7, article 100084, 2024. **doi: 10.1016/j.fraope.2024.100084.**
- [13] O. El Hairch, and A. Lyhyaoui, «Fault detection and diagnosis in condition-based predictive maintenance», in *Proc. of the International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development*, Ensam Rabat, Morocco, May 22-27, 2022, pp. 296-301. **doi: 10.1007/978-3-031-35251-5_28.**
- [14] Naivyshchyi obsiah eksportu Ukrainy u 2021 rotsi maie produktsiia metalurhii ta ahrarnoho sektoru (The greatest contribution to Ukraine's exports in 2021 comes from metallurgy and agricultural products). [Online]. Available: <https://me.gov.ua/News/Detail/a6910472-e124-4ce2-ba27-858bc3310932?lang=uk-UA&title=V2021-RotsiUkrainskiEksporterPokazaliNaibilshiPokaznikiZProdazhuZaKordonMetalivTaRoslinnoiProduktsii>. Accessed on: January 06, 2025.
- [15] International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap, October 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. Accessed on: October 25, 2024.

Стаття надійшла 16.05.2025

Стаття прийнята 05.07.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Ялова А. М., Бондар Н. В. Модернізація турбовітродувок ТЕЦ: технічні аспекти заміни компресора. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 150-159. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344889>.

НАПРЯМИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ОБЕРТОВИХ ПЕЧЕЙ

Ленцов І.А.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7113-536X>, e-mail: lentsov_i_a@pstu.edu;

Умріхін М.О.

аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3476-6767>, e-mail: umrikhin_m_o@aspirants.pstu.edu

У статті представлено аналітичний огляд результатів наукових досліджень щодо покращення роботи обертових печей у чотирьох напрямках: оптимізація гідравлічної роботи печі та запічних теплообмінників, визначення оптимального температурного режиму та температурного профілю вздовж печі, інтенсифікація теплообміну всередині печі, удосконалення систем керування піччю, зокрема за рахунок використання штучного інтелекту. Особлива увага приділяється впливу на підвищення енергоефективності, зниження викидів та покращення якості продукції при виробництві вапна.

Ключові слова: обертові печі, конверторне вапно, кальцинація вапняку, енергозбереження, чисельне моделювання гідродинаміки, системи керування.

Постановка проблеми

Негашене вапно, як важлива сировина, широко застосовується в металургії, виробництві паперу, пластмас, очищенні води та сушінні харчових продуктів [1].

У 2022 році світове виробництво негашеного вапна досягло 430 мільйонів тон [2], з них – 88% вапна високого ступеня кальцинації та високої активності [3]. Активним інгредієнтом негашеного вапна є оксид кальцію, який в основному отримують шляхом кальцинації вапняку (осадової породи, що складається переважно з карбонату кальцію). У промисловості для виробництва негашеного вапна використовуються різні типи печей, включаючи регенеративні печі з паралельним потоком, кільцеві шахтні печі та обертові печі [3]. Окрім виробництва вапна, обертові печі також використовуються при випалі клінкеру в цементній промисловості.

Обертові печі мають переваги у високій продуктивності та якості негашеного вапна. Однак, незважаючи на тривалу історію використання та постійне вдосконалення конструкцій, їх експлуатація досі супроводжується низкою проблем, що негативно впливають на ефективність виробництва, енергоспоживання та екологічну безпеку [4].

Основними проблемами обертових печей є: високі втрати тепла, зношування футеровки, нестабільність режимів горіння, а також значні викиди шкідливих речовин. Крім того, складність управління процесами в обертових печах обумовлює потребу в застосуванні сучасних засобів автоматизації, математичного моделювання та цифрових технологій.

У контексті глобальних викликів – енергетичної кризи, посилення екологічних норм, зростання вартості ресурсів – питання оптимізації роботи обертових печей набуває особливої актуальності. Існує багато підходів до вирішення цієї проблеми: починаючи від моделювання теплотехнічних та гідродинамічних процесів до впровадження інтелектуальних систем управління. Проте ці підходи часто розглядаються

ізолювано, без урахування комплексного впливу на весь виробничий процес.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Перші обертові печі були введені в експлуатацію Томасом Кремптоном ще у 1880 році [5] для виробництва цементу, а згодом і випалу вапна. На той час було важко визначити, як покращити роботу обертових печей, оскільки залишалося багато недосліджених параметрів, що впливають на енергоефективність та якість продукту, а саме: точна кількість тепла, необхідного для хімічного процесу дисоціації вапняку, кількість необхідного атмосферного повітря, вплив параметрів факелу на випал матеріалу, вплив вологості та фракції матеріалу, а також, багатьох інших аспектів. У 1898 році Гаррі та Сімен удосконалили конструкцію обертових печей, додавши до неї охолоджувач клінкеру (основна складова цементу), що покращило якість клінкеру та збільшило продуктивність печі [6]. Згодом охолоджувачі вдосконалювали, винайшовши супутникові або планетарні охолоджувачі, що складалися з набору трубок (зазвичай від 7 до 10), прикріплених до циліндра печі [6]. Вони мають перевагу у герметичності корпусу печі та відсутності потреби в окремому приводі. У 1930 році в Німеччині в експлуатацію вперше був введений решітковий попередній підігрівач сировини, що нагрівав матеріал, який подається в піч за допомогою гарячих димових газів. Поява печей з підігрівачами завершило формування сучасної конструкції обертової печі, що складається з трьох елементів: підігрівача, самої обертової печі та охолоджувача.

В подальшому всі вказані елементи проходили конструкторські вдосконалення. Підігрівачів почали використовувати декілька, що покращувало тепловіддачу димових газів та підвищувало температуру матеріалу. Охолоджувачі змінили свою конструкцію на більш енергоефективні – шахтні [7].

Енергоефективність самої печі також покращувалась за рахунок використання нових теплоізолюючих матеріалів, покращення конструкцій паливника як для

роботи на декількох видах палива [8], використання багатоканальних пальників з регулюванням довжини факелу [9, 10].

Окрім того в конструкцію печі почали додавати нові конструкторські елементи, що покращують теплообмін всередині печі, як то цепи та лопатки, які покращують переміщення матеріалу [11].

В той же час дослідження фізичних процесів, що відбуваються всередині печі ще є неповними. Тому сучасні науковці більше приділяють увагу саме цьому. Наразі можна виділити чотири основних напрями досліджень: оптимізація гідравлічної роботи печі та запічних теплообмінників, визначення оптимального температурного режиму та температурного профілю вздовж печі, інтенсифікація теплообміну всередині печі, удосконалення систем керування піччю. Детальний огляд цих напрямів описаний у розділі «Виклад основного матеріалу».

Мета статті

Проаналізувати сучасні підходи до оптимізації роботи обортових печей, узагальнити наукові та практичні досягнення у сфері підвищення їх енергоефективності, продуктивності та екологічної безпеки, а також визначити перспективні напрями подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу

1. Огляд досліджень з оптимізації гідравлічної роботи печі та запічних теплообмінників

Переважає більшість робіт в цьому напрямку ґрунтується на результатах обчислювальної гідродинаміки (CFD). Завдяки цьому з'являється можливість аналізувати складні явища, які важко виміряти безпосередньо в промислових умовах.

Дослідження за допомогою CFD можна поділити на наступні напрями.

Аналіз процесів течії газів всередині печі

У джерелах [12-15] наведені результати досліджень динаміки руху потоку газів в обортовій печі. Дослідження проводилося за допомогою методів CFD на спрощених моделях реальної печі, а також з використанням фізичних експериментів на основі лазерних технологій.

В результаті досліджень [12, 13, 15] виявлено, що профіль потоку в печі значною мірою залежить від розподілу вторинного повітря між вхідними отворами і їх розташуванням відносно пальника. Окрім цього, у дослідженнях приділена увага до зони рециркуляції димових газів, що утворюється біля зрізу сопла пальника. Ця зона дуже важлива для підтримки стабільного горіння, бо гарячі димові гази виступають запальником паливно-повітряної суміші, що виходить з пальника. У роботах доведено, що розподіл повітря між двома вхідними каналами суттєво впливає на загальну довжину факелу та зони рециркуляції. При рівному розподілі вторинного повітря за умови вертикального

розташування каналів, в печі спостерігаються коливання з великою амплітудою. Амплітуда зменшується, коли один з вхідних струменів стає домінуючим, а найменші коливання можна побачити у випадку розподілу 70/30. Домінуючий струмінь притягує інший і стабілізує поле потоку [13].

В роботі [14] відзначається, що результати моделювання аеродинаміки печі в значній мірі залежать від вибору моделі турбулентності, яка повинна бути здатною фіксувати як турбулентні, так і керовані тиском вторинні потоки, а також, що найважливіше, процес утворення і відриву вихорів.

У джерелі [16] CFD моделювання обортової печі застосовується для визначення впливу складу палива на гідродинамічні процеси всередині печі. Авторами розглянуті такі види палива, як вугілля, біомаса, мазут, природний газ, коксовий газ та корекс-газ (аналог доменного газу). Корекс-газ був обраний для експерименту з огляду на його характеристики та склад: 42% монооксиду вуглецю (CO), 31% діоксиду вуглецю (CO₂), 19% водню (H₂), 2% азоту (N₂), 1,9% метану (CH₄) та теплотворну здатність близько 2000 ккал/м³. В результаті моделювання, автори отримали розподіли температури, швидкостей потоку та концентрацію кисню всередині обортової печі. Температура димових газів, що спостерігаються поблизу зони реакції горіння, складає 1260-1500°C, що відповідає зоні активної дисоціації вапняку та дозволяє використовувати корекс-газ в якості палива обортової печі для випалу вапна. Найбільша швидкість димових газів спостерігається в зоні виходу пальника, де відбувається процес згорання палива за допомогою повітря з первинного та вторинного впускних отворів. Окрім того, авторами доведено, що змішування палива та повітря може бути покращено шляхом розташування їх вхідних отворів з протилежних бокових сторін пальника. Також в рамках дослідження встановлено, що найбільша концентрація O₂ в димових газах досягає 0,2% біля виходу пальника та зменшується до 0,02% на виході з печі.

Аналіз впливу рециркуляції димових газів на кількість шкідливих викидів

Обортова піч – це високотемпературний агрегат, під час роботи якого виділяється велика кількість шкідливих речовин [17], зокрема NO_x. Тому зараз багато дослідників вивчають способи зниження викидів під час роботи обортової печі.

Наприклад, автори [18] пропонують знижувати викиди NO_x за допомогою рециркуляції димових газів. Завдяки моделюванню, дослідники детально розглянули вплив додавання димових газів у первинне та вторинне повітря вапнякової обортової печі на характеристики горіння, утворення NO_x та ступінь кальцинації вапняку. В результаті досліджень отримано наступні висновки: додавання димового газу до первинного повітря посилює ефект витягування, що призводило до подовження довжини полум'я, зниження першого піку температури факелу та підвищення другого піку. Детальний аналіз розподілу температури вздовж осі печі

показав, що перший пік утворюється внаслідок згорання летких речовин у пило вугільному паливі, а другий – внаслідок згорання коксового газу. При розбавленні первинного повітря димовими газами у 20%, перша пікова температура зменшується на 149,9 градусів, але друга зростає на 45,0 градусів. При додаванні димових газів до вторинного повітря перша та друга пікові температури зменшуються на 35,8 та 81,5 градусів відповідно. Це приводило до зменшення утворення NO_x . Для випадку додавання димових газів у первинне повітря, утворення NO_x знижувалось на 22,5%, тоді як розбавлення вторинного повітря знижувало NO_x на 80,5%. Проте, додавання димових газів у повітря в обох випадках знижувало ступінь кальцинації вапняку. Зокрема, розбавлення вторинного повітря знижувало ступінь кальцинації на 5,9%, та на 1,6% – для первинного повітря за рахунок зниження температури димових газів.

Автори статті [19] пропонують боротись зі зниженням температури димових газів при їх рециркуляції за допомогою збагачення повітря киснем. У своїй роботі вони спираються на дослідження [20], в якому вказується, що концентрація викидів NO_x у випадку повітряного горіння зазвичай вища, ніж у випадках киснево-паливного горіння, оскільки у сценаріях киснево-паливного горіння немає утворення теплового NO . Загальні коефіцієнти зниження викидів NO_x для випадків киснево-паливного палива, порівняно з випадком з повітряним паливом, становили ~18% та ~9% загалом для випадків концентрації O_2 у 27% та 29% відповідно. Збільшення концентрації NO_x у випадку $\text{O}_2 = 29\%$ порівняно з випадком $\text{O}_2 = 27\%$ ймовірно було результатом вищої концентрації O_2 у середовищі горіння і, таким чином, посилювало перетворення азоту палива на NO . Окрім того, результати моделювання у [19] показали, що у випадках киснево-паливного горіння конвективні та радіаційні потоки енергії від факелу до матеріалу можуть бути збільшені у 2-4,5 рази порівняно з горінням на основі повітря. Це свідчить про те, що швидкість виробництва клінкеру може бути збільшена за тих самих витрат палива, або споживання палива може бути зменшено при збереженні того ж виробництва клінкеру.

Довжина полум'я у випадках киснево-паливного спалювання на 30-65% коротша, ніж у спалюванні палива звичайним повітрям, що дозволяє використовувати коротші конструкції печей і може покращити високотемпературні реакції клінкерування в процесі виробництва цементу. Однак автори зауважують, що у цій галузі потрібні додаткові дослідження.

В джерелі [21] досліджується зниження викидів NO_x та якість цементного клінкеру при додаванні зеленого аміаку (NH_3) в факел. Автори розглядають NH_3 як перспективне безвуглецеве паливо, однак його вплив на якість клінкеру та викиди оксидів азоту (NO_x) у цементних печах досі залишається мало дослідженим. Автори створили детальну одномірну модель взаємодії газу та твердої речовини на основі промислової

цементної обертової печі. За допомогою CFD досліджувався процес згорання та вплив кількості NH_3 на розподіл тепла, а також оцінювалася кількість утворених забруднюючих речовин. Автори досліджень прийшли до наступних висновків: спільне спалювання NH_3 призводить до зниження температури газу та клінкеру в зоні горіння. При збільшенні частки NH_3 у паливі від 0% до 50% максимальна температура полум'я знижується з 2085 К до 1780 К, а температура клінкеру падає з 1645 К до 1530 К. Це пов'язано з вищою прихованою теплотою випаровування NH_3 та ендотермічною дисоціацією NH_3 . При збільшенні частки NH_3 до 20% викиди NO_x підвищуються. Це відбувається через те, що більша кількість NH_3 сприяє утворенню термічних- та швидких NO_x . При подальшому збільшенні частки NH_3 (від 20% до 50%) викиди NO_x знижуються, оскільки надлишковий NH_3 діє як відновник для NO . Збільшення частки NH_3 негативно впливає на якість клінкеру, що проявляється у зменшенні вмісту C_3S та збільшенні вільного CaO . Це пов'язано зі зниженням температури в зоні горіння, що перешкоджає повному формуванню C_3S . Термічна ефективність печі знижується зі збільшенням частки NH_3 . Однак додавання NH_3 демонструє значне зменшення утворення CO_2 та нульові викиди CO та NH_3 . Результати досліджень свідчать про те, що для досягнення бажаної якості клінкеру та ефективності спалювання необхідно оптимізувати параметри процесу горіння при додаванні NH_3 у паливо.

Визначення оптимальних параметрів факелу

Розроблені CFD-моделі успішно прогнозують характеристики роботи обертових печей, а також допомагають дослідити вплив типу факелу на процеси теплообміну в печі.

Так, метою роботи [22] є поглиблене дослідження аеродинаміки дифузійного факелу в обертовій цементній печі. Автори проводили аеродинамічне моделювання печі з використанням покращеної моделі турбулентності k-ε на основі ренормалізаційної групи (RNG), яка здатна враховувати утворення вихорів. Взаємодії між турбулентністю та дифузійним полум'ям оброблялися за допомогою функції щільності ймовірності. В результаті моделювання було встановлено, що:

- зона рециркуляції димових газів до вихідного отвору пальника має велике значення для процесу горіння, оскільки зворотний потік димових газів покращує стабільність полум'я;
- режими подачі палива та повітря безпосередньо впливають на довжину факелу вздовж печі, а також опосередковано – на утворення кільцевих зон спікання;
- регулювання потоку вторинного повітря в пічі є важливим для поліпшення горіння та уникнення перешкод просування матеріалу вздовж печі;
- використання дифузійного типу факелу в обертових печах позитивно впливає на процес випалу клінкеру завдяки більшій та однорідній поверхні факелу,

що допомагає збільшити продуктивність оберткової печі;

- правильний вибір конструкції пальника дозволяє створювати досить компактні зони горіння, уникаючи удару факелу об стіни печі. Заглиблення пальника у піч впливає на профіль швидкості та температурний профіль в печі, а також на об'єм вторинного повітря, що надходить з охолоджувача до печі.

Автори роботи [23] за допомогою CFD також досліджують параметри факелу. Але, на відміну від попередньої статті, у цій роботі досліджується закручене (турбулентне) полум'я при моделюванні течії та характеристик факелу. В роботі використовувалися моделі турбулентності k-ε та k-ω для симуляції, а також експериментальні дані для перевірки. Головні висновки з цього дослідження показують, що зі збільшенням закручування полум'я стає коротшим та ширшим. При інтенсивному закручуванні в центрі полум'я утворюється зворотний потік, що призводить до формування внутрішньої зони рециркуляції. Ця зона стабілізує полум'я, захоплюючи гарячі продукти згорання та забезпечуючи стабільний профіль температури. Низька інтенсивність закручування (коефіцієнт закручування до 0,5) призводить до відносно короткого факелу з меншим кутом розкриття. Зі збільшенням коефіцієнта закручування, розкриття полум'я збільшується.

Кількість завихрювачів первинного повітря має значний вплив на довжину факелу при нижчому співвідношенні діаметра кільця на вході первинного повітря ($d_{\text{повітря}}/d_{\text{палива}} = 2,3$). Факел подовжується зі збільшенням числа завихрювачів первинного повітря – довжина збільшується на 20% та 6% зі збільшенням числа завихрювачів від 6 до 12 для $d_{\text{повітря}}/d_{\text{палива}} = 2,3$ та 5 відповідно. Факел також подовжується зі збільшенням діаметра кільця вхідного первинного повітря – полум'я подовжується приблизно на 19% зі збільшенням $d_{\text{повітря}}/d_{\text{палива}}$ від 2,3 до 5.

Розробка оптимальної конструкції запічних охолоджувачів/нагрівачів

Моделювання газових потоків дозволяє розробляти більш економічні та екологічні конструкції запічних теплообмінників та покращувати існуючі. Наприклад, у роботі [24] представлено дослідження моделювання клінкерного охолоджувача та оцінки його продуктивності. Задля цього автори розробили зменшену модель клінкерного охолоджувача у масштабі 25:1. Симуляція проводилася з використанням інструментів CFD, зокрема програмних комплексів SolidWorks та ANSYS. В результаті моделювань дослідники прийшли до наступних результатів. При витраті клінкеру 0,2 кг/с та висоті шару клінкеру 0,6 м і витраті охолоджуючого повітря 0,54 кг/с була досягнута оптимальна продуктивність охолоджувача з температурою клінкеру на виході 68°C. Зменшення висоти шару клінкеру до 0,3 м призводило до зростання температури клінкеру на виході до 162,4°C. Модельний охолоджувач мав питому витрату повітря 1,9 м³/кг клінкеру, що на 12% вище, ніж у існуючого охолоджувача (1,7 м³/кг

клінкеру). Масштабована модель охолоджувача продемонструвала на 15% вищу рекуперативну здатність та на 10% вищу енергоефективність порівняно з існуючим охолоджувачем.

Моделювання процесів горіння альтернативних видів палива

CFD використовується для оцінки технічних можливостей щодо заміни викопного палива альтернативним, що зазвичай сприяє зменшенню шкідливих викидів та знижує собівартість продукції.

Так у роботі [25] представлені результати CFD моделювання спалення в цементній обертковій печі м'ясо-кісткового борошна (МКБ) у порівнянні з вугіллям. Оскільки МКБ є 100% біомасою, то, на відміну від викопного палива, його спалення не призводить до істотного збільшення CO₂ в атмосфері. Моделювання процесу спалення борошна дозволило визначити, що пік температури факелу досягається ближче до виходу пальника, ніж при спаленні вугілля. Це відбувається через більшу кількість летких речовин у м'ясо-кістковому борошні. Однак в подальшому температура факелу, через високий вміст вологи та золи у борошні, стає нижчою ніж при використанні вугілля. До зниження температури факелу також призводить більша кількість повітря, необхідна для спалення МКБ. Зважаючи на вищезазначені результати, автори прийшли до висновку, що використання м'ясо-кісткового борошна в якості єдиного палива не доцільне та потребує поєднання з більш калорійним паливом.

Проаналізувавши роботи з моделювання гідравлічного режиму роботи оберткової печі за допомогою CFD симуляції можна зробити наступні висновки щодо оптимізації роботи печі:

- стабільне горіння палива досягається за умови оптимального розподілу вторинного повітря у співвідношенні 70/30 між верхнім та нижнім каналом відповідно;
- щоб горіння було стійке, у вихідного отвору пальника має сформуватись зона рециркуляції гарячих димових газів, яка слугує «запальником» паливо-повітряної суміші. За допомогою регулювання потоків вторинного повітря цю зону можна зменшувати або збільшувати;
- в результаті CFD моделювання можна розраховувати не тільки гідродинамічні показники, а й прогнозувати температуру факелу та димових газів;
- рециркуляція димових газів до потоків повітря може значно знизити утворення NO_x, але це призводить до зменшення температури всередині печі та зниження якості вапна на майже 6%;
- для збільшення температури всередині печі можна до повітря додавати чистий кисень. Це призводить до зниження викидів NO_x, збільшує теплообмін від факелу у 2-4,5 рази та скорочує довжину факелу на 30-65%, що гіпотетично дозволяє зменшити довжину оберткової печі та знизити втрати тепла через стінки;
- в оберткових печах для випалу клінкеру або вапняку використання дифузійного типу факелу більш

оптимальне. Такий факел має більш однорідну температуру та тепловіддачу по довжині, що позитивно впливає на контроль процесу випалу;

- на довжину факелу впливає кількість завіхрювачів первинного повітря, а також відношення діаметру кільця каналу первинного повітря до діаметру каналу палива. Полум'я подовжується приблизно на 19% зі збільшенням $d_{\text{повітря}}/d_{\text{палива}}$ від 2,3 до 5.

2. Визначення профілю температур вздовж печі

Іншим напрямом оптимізації роботи обертових печей є дослідження температурного режиму та профілю температур димових газів вздовж печі. Процес кальцинації вапняку відбувається при досить високих температурах всередині печі (близько 1200-1500°C). При цьому сам вапняк починає дисоціювати при досягненні середньомасової температури 850-900°C. Отже, для якісного та енергоефективного процесу випалу потрібне співпадіння високотемпературної зони печі та достатньо нагрітого матеріалу.

У сучасній практиці для вимірювання температури в обертових печах застосовуються два основні підходи: пряме (апаратне, або «жорстке») та непряме (програмне, або «м'яке») вимірювання.

Апаратні методи передбачають використання високоточних сенсорів, таких як термопари та інфрачервоні камери, для безпосереднього вимірювання температури в окремих зонах печі [26]. Ці методи забезпечують високу точність і надійність, оскільки отримані дані є незалежними від зовнішніх чинників, що позитивно впливає на якість результатів. Водночас апаратні засоби мають низку обмежень: вони потребують дорогого обладнання та регулярного технічного обслуговування, а також надають лише локальні дані, що ускладнює оперативне реагування на зміну умов у всій системі [27, 28].

Програмні методи («м'яке» вимірювання) базуються на інтеграції знань про виробничий процес, легко доступних змінних та математичних моделей. Такий підхід дозволяє оцінювати важковимірювані параметри шляхом обчислень, фактично замінюючи апаратні вимірювання програмними алгоритмами. Це забезпечує гнучкість, зменшує витрати та дозволяє отримувати узагальнені дані про стан системи.

У статті [29] пропонується методика «м'якого» вимірювання для вирішення проблеми складності визначення температури зони кальцинації обертової печі для виробництва вапна. Для моделювання та прогнозування головних компонентів використовуються стохастичні конфігураційні мережі (SCN) з хорошими прогностичними характеристиками. У дослідженні використовувалися 16 параметрів, таких як витрати та тиск газу, температура відхідних газів, швидкість обертання печі, температури голови та хвоста печі, тиск, витрата первинного повітря, температура на вході в пиловугільник і температура зони кальцинування. Для оптимізації ключового параметра – фактору регуляції стохастичних конфігураційних мереж – запропоновано покращений алгоритм рою салп на основі Хаммерслі.

Достовірність моделі «м'якого» вимірювання перевірялась за допомогою фактично зібраних виробничих даних обертової печі для випалу вапна. Множинні оціночні показники та результати порівняння показують, що запропонована модель «м'якого» вимірювання температури зони кальцинації обертових печей має вищу точність прогнозування та якість моделювання порівняно з іншими моделями.

У джерелі [30] також наведені дослідження з розробки моделі «м'якого» вимірювання температури зони кальцинування обертової печі. Однак на відміну від [29], ця модель базується на аналізі головних компонентів (PCA) та мережі зі станом відлуння з протікаючим інтегратором (LI-ESN), оптимізований бінарним алгоритмом рою частинок (BPSO). LI-ESN складається з випадково пов'язаних нейронів, які залишаються незмінними після ініціалізації, і потребує лише невеликої кількості зразків для моделювання, що знижує складність моделі та робить її придатною для «м'якого» вимірювання у виробничих процесах обертових печей. BPSO використовується для оптимізації параметрів динамічного резервуара LI-ESN для досягнення оптимальної продуктивності моделі м'якого вимірювання. BPSO має більшу швидкість збіжності та здатність знаходити кращі рішення за меншу кількість ітерацій порівняно з іншими алгоритмами оптимізації. Результати досліджень показують, що середня абсолютна похибка запропонованої моделі м'якого вимірювання становить 13,54°C. Порівняно з іншими типовими моделями «м'якого» вимірювання, запропонована авторами модель досягла найкращих результатів при порівнянні реальних та прогнозованих значень. До того ж час навчання та час онлайн-прогнозування запропонованої моделі м'якого вимірювання дозволяють впроваджувати її у практичне користування на підприємствах.

Поеднуючи гідродинамічне моделювання та штучний інтелект, дослідники [31] розробили новий метод прогнозування температури в обертовій печі. Завдяки детальному аналізу виробничих даних з заводу та наукової бази, автори визначили ключові фактори, що впливають на динаміку температурного профілю в обертових печах. Використовуючи обчислювальну гідродинаміку (CFD), дослідниками було створено модель спалювання вугільного палива в обертовій печі. Набір даних було згенеровано за допомогою обчислювальних технологій, що охоплюють різноманітні умови, такі як витрати вугілля, температура та об'єм повітря, вміст вуглецю та летких речовин у пиловугільному паливі. Цей набір даних включав 625 окремих випадків. Згодом, використовуючи методи машинного навчання, включаючи алгоритми випадкового лісу (RF) та оптимізованого випадкового лісу (GA-RF), були розроблені прогностичні моделі для динаміки температурного поля обертової печі. Результати порівняльного аналізу продемонстрували, що модель, покращена алгоритмом GA-RF, перевершує продуктивність стандартного підходу RF. Це покращення призвело до значного підвищення точності прогнозування, що

підтверджується зменшенням середньоквадратичної похибки з 25,0879 до 17,5330 та середньої абсолютної похибки з початкового значення 6,5600 до 4,7661. Крім того, новий метод «м'якого» вимірювання, представлений у цій статті, скорочує час моделювання на кілька порядків, зменшивши тривалість розрахунків з двох-трьох тижнів до приблизно 10 секунд.

У статті [32] наведено дослідження методу одноступеневого прогнозування температури зони горіння обертової цементної печі на основі хвильової фільтрації в реальному часі та екстремального машинного навчання з ядром (KELM).

Одноступеневе прогнозування температури зони горіння відіграє важливу роль у контролі безпеки та стабільності роботи цементної обертової печі. Це пов'язано з тим, що аномальні відхилення температури можна виявити раніше, і оператор печі зможе вчасно вжити ефективних заходів для врегулювання. Запропонований метод використовує систему візуального контролю полум'я для визначення температури зони горіння. Далі застосовується фільтрація з обмеженням амплітуди, що відсікає аномальні значення, після чого для навчання та прогнозування використовується KELM, який вирізняється високою швидкістю роботи та здатністю до узагальнення. Для перевірки методу було проведено експерименти на основі місячних даних з цементної печі. Результати показали, що запропонований підхід забезпечує ефективне одноступеневе прогнозування температури зони горіння в реальних умовах.

У дослідженні [33] представлено новий підхід до відстеження зон з високою температурою на поверхні обертової печі. Сучасні системи контролю визначають лише точку з максимальною температурою, тож для усунення цього недоліку автори розробили алгоритм, який працює в багатоінтервальному режимі на основі сканування з рівним кутом. Запропонована методика дозволяє аналізувати геометрію та характеристики поверхні за допомогою теорії сканування з рівним кутом, встановлювати відповідність між реальними розмірами та зображенням, а також усувати спотворення, що виникають у процесі такого сканування. Метод було випробувано на лабораторній моделі обертової печі з використанням інфрачервоного скануючого термометра та системи обробки зображень. Експериментальні дані підтвердили, що алгоритм здатний у режимі реального часу відстежувати не лише максимальну температуру, а й значення, близькі до неї. Розроблений підхід може ефективно застосовуватися для аналізу даних і контролю температурного режиму в обертових печах.

Дослідники у своїй роботі [34] створили та перевірили математичну модель для аналізу температурного профілю в обертовій печі, що використовується у виробництві цементу. Її основою стали диференціальні рівняння масового та енергетичного балансу. Модель враховує реальні вхідні параметри, зокрема швидкість подачі газу й твердих матеріалів, геометрію печі та

хімічний склад сировини. Автори удосконалили класичний підхід [35], ввівши часову зміну температури газу та спростивши опис полум'я до сталої теплотворної здатності. Для розв'язання складних рівнянь застосовували метод кінцевих різниць і метод Рунге–Кутти з контрольованим кроком інтегрування. Отримані результати показали високу узгодженість із даними реального виробництва, за винятком кількох другорядних показників. Аналіз чутливості до зміни швидкості газу та руху твердих речовин виявив, що підвищення швидкості газу на 10% сприяє інтенсивнішому утворенню C_3S , тоді як зниження швидкості подачі матеріалу зменшує пікову температуру в зоні горіння. Розроблена модель може бути застосована для оптимізації керування обертовими печами в промислових умовах.

У висновку до цього напрямку оптимізації роботи обертових печей можна зазначити наступне:

- наведені в огляді моделі «м'якого» визначення температур всередині печі здатні прогнозувати температуру з точністю до $13,5^{\circ}C$ та середньоквадратичною похибкою у $17,53^{\circ}C$;
- тривалість розрахунків за деякими моделями не перевищує 10 секунд, що дозволяє використовувати їх в умовах виробництва;
- існують алгоритми вимірювання температури всередині печі на основі даних про температуру зовнішньої стінки печі;
- деякі моделі здатні прогнозувати аномальні відхилення температур, що робить керування піччю більш контрольованим;
- оптимальне поєднання апаратних і програмних методів є ключовим для створення комплексної системи моніторингу температури, яка поєднує точність, ефективність та адаптивність до змін виробничого процесу.

3. Моделювання теплообмінних процесів

Обертова піч – теплотехнічний агрегат з нестационарними умовами роботи. На її роботу впливають багато факторів, серед яких головними є: хімічний та фракційний склад, вологість матеріалу; параметри палива та повітря для горіння; аеродинамічний режим як в печі, так і в запічних теплообмінниках; стан футерування стін печі та інше. В таких складних умовах розрахунок теплообміну можливий лише за допомогою спеціально розроблених моделей, які враховують радіаційний та конвективний теплообмін між димовими газами та матеріалом; димовими газами та стінками печі; радіаційний, конвективний теплообмін та теплопровідність між стінками печі та матеріалом і, нарешті, теплообмін всередині матеріалу. Тому дослідники намагаються спростити свої моделі та досліджувати лише окремі частини складного теплообміну.

У праці [36] представлено дослідження, присвячене моделюванню теплообміну в обертовій печі з акцентом на передачу тепла всередині шару матеріалу. Автори створили математичну модель, яка описує процес тепловіддачі від газового середовища у вільному просторі до шару в печі. Запропонований підхід

передбачає перетворення двовимірного поперечного перерізу шару на спрощену одновимірну модель обертової печі. Таким чином, була отримана модель, яка значно підвищує можливості симуляції процесів теплообміну в шарі без необхідності точного врахування складних явищ потоку та горіння у вільному просторі. Модель дозволяє передбачати розподіл температур як у самому шарі, так і у футерованій стінці печі для будь-якої осової координати.

Теплообмін в матеріалі також розглядається в роботі [37]. В основі дослідження авторів закладено двофазний підхід та різноманітні моделі теплопередачі, які застосовуються до двовимірного поперечного перерізу обертової печі з урахуванням рухомого гранульованого потоку, яка розглядає випадковий рух гранул, як тепловий молекулярний рух. Розроблені моделі апробовувались шляхом порівняння з наявними експериментальними даними. Результати показують, що найвища температура виявлена на поверхні шару, а градієнт температури в шарі – нижчий, ніж у стінці обертової печі. Основними факторами, що впливають на розподіл температури в матеріалі, є початкова температура газу та швидкість обертання печі.

У джерелі [38] представлена динамічна імітаційна модель обертової печі для виробництва цементного клінкеру. Модель побудована на основі теплотехнічних, хімічних і гідродинамічних моделей для симуляції випалу клінкеру. Вона представлена як 1D-модель, яка враховує теплообмін між газовою фазою і матеріалом у зустрічному напрямку. Швидкість руху матеріалу залежить від швидкості обертання печі, а швидкість подачі газу визначається рівнянням Дарсі-Вейсбаха. Теплова конвекція між газом, твердими частинками та стінкою описується коефіцієнтами, визначеними Цшенгом [39]. Теплове випромінювання описується формулою, де враховуються постійна Стефана-Больцмана, коефіцієнт випромінювання та коефіцієнт форми поверхні теплообміну. Запропонована модель має гнучкість, що дозволяє легко додавати нові уточнення та вхідні параметри для отримання більшої точності розрахунків. Симуляція на основі моделі показала, що умовна піч виходить на стаціонарний режим приблизно за 28 годин, що відповідає реальному часу запуску обертових печей (24-48 годин).

Автори [40] пропонують спрощену модель, яка описує теплообмін між твердими частинками матеріалу та димовими газами в обертових печах із лопастями. Модель розглядає циліндричний канал, в якому газ взаємодіє з суспензією та гранульованим шаром та описує теплообмін між чотирма основними фазами: газом, щільним гранульованим шаром, розрідженим двофазним середовищем та стінками. Також розглядається теплове випромінювання між цими фазами. За відсутності радіаційного теплообміну, модель передбачає експоненціальні зміни температур, що залежать від швидкості потоку матеріалу і газу, а також від площі теплообміну. При врахуванні випромінювання, модель може бути вирішена чисельно. Для цього зміни

температури можна апроксимувати розтягнутими експонентами, параметри яких є незалежними від досліджуваних фаз. Попри свою простоту, модель враховує основні експериментальні дані у випадку розрідженого пило-газового потоку, що характерно для багатьох промислових обертових печей.

У роботі [41] для обертової печі з випалу вапна розроблено комп'ютерну модель теплопередачі на основі методу скінченних різниць, що працює в стаціонарному режимі. Модель імітує процес випалювання твердих часток вапняку в обертової печі конвективним турбулентним потоком димових газів, теплообміном випромінюванням між гарячим газом, вогнетривкою стінкою та поверхнею вапняку, а також теплопровідністю у вогнетривкій стінці печі. Для точності розрахунків піч розділена на осові сегменти однакової довжини. Конвективна теплопередача від газу до стінки та твердого тіла оцінювалась за допомогою автономної моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD). Баланси маси та енергії для вапняку та газу в кожному сегменті використовуються для розрахунку температур матеріалу та газу на виході з відповідного сегмента.

Щоб змодельовати випалювання вапняку, була використана модель «скороченого ядра» з контролем швидкості поверхневої реакції. Вихідні дані включають розподіл температур всередині вогнетривкої стінки, розподіл температур вапняку і газу вздовж осі, профіль відсотка випалювання вздовж осі та довжині печі. Довжина моделі печі для апробації цієї моделі становить 5,74 м, тоді як довжина дослідної печі, що використовувалася в експериментальному дослідженні Уоткінсона та Брімакомба [42], становить 5,5 м. В результаті аналізу роботи моделі вчені дійшли наступних висновків: швидкість потоку твердих частинок вапняку найбільше впливає на профілі температури та процес випалювання. Збільшення потоку твердих частинок уповільнює зростання температури вапняку на вході, але прискорює його на виході. Це також призводить до вищої температури газу, оскільки виділяється більше CO_2 . Збільшення розміру фракції призводить до посилення теплопередачі до шару та випалювання, вища швидкість випалювання спостерігається при меншому розмірі частинок. Збільшення кута нахилу або швидкості обертання печі призводить до меншої ефективності теплопередачі до твердих частинок через скорочення часу перебування, що, своєю чергою, вимагає більшої довжини печі для досягнення тієї ж якості випалювання.

У статті [43] представлено аналітичну одновимірну модель для прогнозування впливу різних змінних печі на регенеративну тепловіддачу від стінок. Основною моделі є шар з «зосередженою ємністю» та нескінченною провідністю в радіальному напрямку. Товщина цього шару визначається з проникнення тепла в наполовину нескінченне тіло. Розглянуті параметри включали діаметр печі, швидкість обертання, ступінь заповнення, властивості матеріалу стінки, а також

теплопередачу від газу до стінки і від стінки до твердого тіла.

На основі обчислень моделі зроблено висновок, що в обортових печах регенеративна теплопередача через стінку значно менша, ніж прямий тепловий потік від газу і сягає від 5 до 20%. Проте за умов «злипання» матеріалу в лабораторних печах вплив стінки може досягати 40%.

Складні моделі теплообміну всередині обортових печей потребують значних комп'ютерних потужностей та багато часу на розрахунки. Тому важливо знайти оптимальну модель, яка буде поєднувати в собі як точність, так і швидкість розрахунків.

4. Вдосконалення систем керування обортовими печами

Оскільки обортові печі – агрегат з динамічними умовами роботи, то для керування ними потрібні системи із швидким відгуком. Від того, як швидко оператор печі прийме рішення, залежить якість обробленого матеріалу, енергоємність виробництва та екологічна безпека. Із ростом застосування інструментів штучного інтелекту (ШІ) в промисловості, їх впровадження почалось і в процесах керування обортовими печами. Наприклад, у роботі [44] представлено метод розпізнавання стану горіння в цементній обортовій печі за допомогою аналізу штучним інтелектом зображень полум'я. Точне розпізнавання стану горіння має важливе значення для підвищення якості клінкеру, безпечної роботи печі та зменшення споживання палива. Авторами статті запропоновано метод розпізнавання стану горіння, що базується на сегментації зображення полум'я за допомогою методу Оцу-Кмінс та машини опорних векторів (МОВ). Спочатку зображення полум'я з основної зони горіння в печі отримується за допомогою передової технології візуального виявлення, а потім використовується метод сегментації зображень Оцу-Кмінс для ефективної сегментації цільової області полум'я. На цій основі було виділено 10 параметрів цільової області, як ознаки для розпізнавання. Потім, використовуючи однохвилинне середнє значення виділених параметрів як вхідні дані та три типові стани горіння як вихідні, була створена модель розпізнавання на основі МОВ. Результати показали, що для 30 тестових наборів зразків розроблена модель розпізнавання може правильно ідентифікувати 28 наборів зразків, що демонструє високу точність у розпізнаванні стану горіння в цементних обортових печах.

На відміну від [44], дослідники з [45] для аналізу якості горіння використовують не фото, а відео полум'я. У роботі наголошується, що традиційні методи, засновані на аналізі окремих 2D зображень, є обмеженими, оскільки не враховують динамічну інформацію про полум'я, таку як мерехтіння і зміна, які є важливими індикаторами стабільності горіння. Відеокліп, на відміну від статичних зображень, надає просторовий вигляд, структурні зміни та інформацію про рух. Розроблена модель витягує ознаки як з просторових, так і з часових вимірів на основі кількох сусідніх кадрів.

Окрім того, автори створили два нові тривимірні (3D) дескриптори: обчислювально простий та швидкий дескриптор динамічної текстури, 3DBLBP, та дескриптор динамічної структури, НОРС-ТОР.

Однак параметри факелу всередині печі залежать від багатьох факторів, таких як склад палива та його кількість, швидкість потоку повітря, тому його яскравість та форма часто змінюються. Тим часом велика кількість пилу, що присутня всередині печі, серйозно впливає на якість запропонованої технології обробки зображень для точного визначення умов спікання за зображеннями полум'я. Більше того, багато запропонованих методів, заснованих на зображеннях факелу, поділяють лише на три типи. А саме: перегрітий, переохолоджений та нормальний [46]. Така груба класифікація, змінних зворотного зв'язку, обмежує можливість точного керування процесом. Тому авторами [47] пропонується гібридна динамічна модель прогнозування (HDPF) для здійснення точного онлайн-прогнозування параметрів роботи печі. Щоб врахувати затримку в часі та часові зміни, використовується метод реконструкції фазового простору (PSR). Порівняльні експерименти показують, що HDPF має найвищу точність прогнозування та найвищу надійність щодо чотирьох видів шуму даних, що робить його придатним для застосування в промислових умовах. Крім того, модель має низьку обчислювальну складність, що відповідає вимогам реального часу для моніторингу та керування роботою обортової печі

Штучний інтелект використовується не тільки для аналізу зображень та відео, на його основі можна створювати навіть моделі керування. Наприклад, модель керування на основі штучної нейронної мережі, запропонована авторами [48], дозволила отримати теоретичний ККД печі в 61,5%. Для цього дослідники розробили модель симуляції процесів в печі за допомогою програмного комплексу Aspen Plus. Потім автори з використанням нейронної мережі знаходили оптимальні параметри роботи печі, такі як: виробництво печі, витрати палива, витрати повітря для охолодження клінкеру, тощо. Апробація моделі на дійсній промисловій печі показала високий коефіцієнт кореляції $R^2=0,991$.

Розробка моделей керування на основі прогнозуючого контролю – досить популярний напрям оптимізації роботи обортової печі. Авторами [49] для контролю та оптимізації процесу випалювання клінкеру у виробництві цементу використовується модель, що враховує теплопередачу між газом та сировиною через конвекцію та випромінювання. Крім того, вона враховує такі параметри, як енергія хімічних реакцій, транспортування сировини, втрати енергії тощо. Модельний прогнозуючий контролер використовується для стабілізації температурного профілю вздовж обортової печі, сталого та оптимального горіння палива та максимізації виробництва. Окрім того, у статті представлено унікальний підхід до моделювання, що розділяє процес на окремі зони: нагріву, кальцинації, перехідну, горіння та охолодження. Кожна зона моделюється за

допомогою енергетичного та масового балансу. Це дозволяє створити загальний метод для моделювання та контролю будь-якого типу виробничої лінії цементного клінкеру. Дослідження враховує використання альтернативних видів палива (як-от відходи домашнього господарства, шини, відходи тваринництва), що вносить значну мінливість у теплотворну здатність та характеристики горіння. Представлена модель була успішно впроваджена на цементному заводі в Швейцарії та працювала з середнім часом безвідмовної роботи понад 95%. Результати на пілотному об'єкті показали, що контролер ефективно утримує ключові змінні процесу (температура зони горіння, температура на виході з печі, рівень кисню) у бажаних діапазонах, одночасно підтримуючи швидкість подачі сировини близькою до максимальної. Це підтверджує, що запропонований підхід, який поєднує модель, засновану на первинних принципах, з модельним прогнозуючим контролем та оцінюванням рухомого горизонту, є ефективним для стабілізації та оптимізації складних промислових процесів, таких як виробництво цементу.

Висновки

Оптимізація роботи обортових печей є складним завданням, що вимагає комплексного підходу урахуванням глибокого розуміння фундаментальних фізичних процесів (гідродинаміка, теплообмін) з передовими методами моделювання та керування, зокрема за допомогою штучного інтелекту.

Розглянуті напрямки – моделювання гідродинамічних процесів в печі та теплообмінниках, визначення оптимального температурного режиму та розподілу температур, моделювання теплообміну всередині печі та застосування моделей керування на основі штучного інтелекту – не є відокремленими, а глибоко взаємопов'язаними. Наприклад, CFD-моделі надають детальні дані про рух димових газів для розрахунку теплообміну, який, у свою чергу, полягає у визначенні температурного режиму, а ШІ потім оптимізує керування на основі цих параметрів.

Взаємозв'язок між CFD-моделюванням (для розуміння газо-твердофазних потоків та теплообміну), термічними моделями (для оптимізації температурних профілів та структурної цілісності) та ШІ-системами (для адаптивного керування в реальному часі) є ключовим для досягнення максимальної енергоефективності, зниження витрат та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Перспективи інтеграції різних моделей та подальших досліджень

Подальші дослідження повинні зосередитися на поглибленні інтеграції цих напрямків. Розробка гібридних моделей, що поєднують фізично обґрунтовані принципи з можливостями машинного навчання, може забезпечити високу точність та адаптивність, необхідну для керування складними системами обортових печей. Це включає вдосконалення моделей зниженого

порядку, отриманих з CFD, для їх безшовної інтеграції в системи керування на основі ШІ.

Особлива увага має бути приділена вдосконаленню моделей радіаційного теплообміну, враховуючи складність середовища печі (багатоатомні гази, пилове навантаження). Також важливим є подальший розвиток ШІ-алгоритмів, які можуть ефективно обробляти неточні та зашумлені дані, характерні для промислових умов, та інтегрувати неявні знання досвідчених операторів для підвищення надійності та безпеки керування.

Загалом, майбутні напрямки досліджень мають бути зосереджені на створенні самоадаптивних, інтелектуальних систем, які зможуть не лише оптимізувати поточну роботу печей, але й прогнозувати та запобігати потенційним проблемам, забезпечуючи сталий розвиток промисловості з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Перелік використаних джерел

- [1] A study case of energy efficiency, energy profile, and technological gap of combustion systems in the Colombian lime industry / V. Alcántara et al. *Applied thermal engineering*. 2018. Vol. 128. Pp. 393-401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.018>.
- [2] Lori E. Apodaca. Lim. (Data in thousand metric tons unless otherwise noted). URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lime.pdf> (дата звернення 04.07.2025 р.)
- [3] Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy procedia*. 2017. Vol. 120. Pp. 75-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.156>.
- [4] Boateng A. A. Rotary kilns. Elsevier, 2008. 347 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7877-3.x5001-6>.
- [5] Lea F. M., Hewlett P. C. Lea's chemistry of cement and concrete. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2003. 1088 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6256-7.X5007-3>.
- [6] Peray K. E. The rotary cement kiln. New York : Chemical Publishing Co., 1986. 389 p.
- [7] Ленцов І. А., Ленцов Д. І. Анализ практического использования шахтного охладителя известня конструкции ООО СНПП «Известа» в условиях комбината «АЗОВСТАЛЬ». *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2013. Вип. 27. С. 124-128.
- [8] Пальник для подачі твердого, рідкого або газоподібного палива у зону горіння випалювальної печі: пат. 98625 Україна: МПК F23D14/20 F23D11/36 F23D14/58 F23D17/00 F23D5/00; заявл. 22.10.2007, опуб. 11.06.2012, Бюл. № 11. 4 с.
- [9] Пальники для обортових печей. URL: <https://ensol.llc/gorelki/gorelki-dlya->

- [vrashhayushhihsya-pechej/](#) (дата звернення 12.08.2025).
- [10] Пікашов В. С., Троценко Л. Н., Виноградова Т. В. Удосконалення системи опалення обертової печі для випалу вогнетривкої глини. *Теплотехніка та енергетика в металургії*: Праці XVI Міжнародної конференції, м. Дніпропетровськ, 4-6 жовтня 2011. С. 168-169.
- [11] Креховецький О. М., Сибірний А. В., Петрова М. А. Шляхи покращення роботи обертових печей для випалу цементного клінкеру з метою економії витрати енергоносіїв. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2010. Вип. 20.1. С. 112-116.
- [12] Kiln aerodynamics visualization of merging flow by usage of PIV and CFD with application to grate-kiln induration machines / I. S. Larsson et al. *7th international conference on CFD in the minerals and process industries CSIRO*. Melbourne, Australia, 9-11 December 2009.
- [13] Visualization of Merging Flow by Usage of PIV and CFD with Application to Grate-Kiln Induration Machines / I. A. S. Larsson et al. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 5(4). Pp. 81-89. DOI: <https://doi.org/10.36884/jafm.5.04.19464>.
- [14] Larsson I. A. S., Lundström T. S., Marjavaara B. D. Calculation of kiln aerodynamics with two RANS turbulence models and by DDES. *Flow, turbulence and combustion*. 2015. Vol. 94, no. 4. Pp. 859-878. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10494-015-9602-8>.
- [15] Secondary flow in semi-circular ducts / Larsson I. A. S., Lindmark E. M., Lundström T. S., Nathan G. J. *Journal of fluids engineering*. 2011. Vol. 133, no. 10. Article 101206. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4004991>.
- [16] Kumar D., Dewangan A. Computational fluid dynamics modelling of the rotary lime kiln. *Proceedings of the 26th national and 4th international ISHMT-ASTFE heat and mass transfer conference*, Tamil Nadu, 17-20 December 2021. Pp. 1-6.
- [17] Bisulandu B.-J. R., Huchet F. Rotary kiln process: an overview of physical mechanisms, models and applications. *Applied thermal engineering*. 2023. Vol. 221. Article 119637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119637>.
- [18] Zhang Y., Wang S. Numerical simulation of flue gas recirculation in a lime rotary kiln. *Energy*. 2024. Vol. 297. Article 131098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131098>.
- [19] Effect of flue gas recirculation during oxy-fuel combustion in a rotary cement kiln / D. A. Granados et al. *Energy*. 2014. Vol. 64. Pp. 615-625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.045>.
- [20] Al-Abbas A. H., Naser J. Effect of chemical reaction mechanisms and nox modeling on air-fired and oxy-fuel combustion of lignite in a 100-kw furnace. *Energy & fuels*. 2012. Vol. 26, no. 6. Pp. 3329-3348. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef300403a>.
- [21] Green ammonia co-firing in cement rotary kiln: numerical investigation on clinker quality and NOx emission by gas-solid interaction / H. Lin et al. *Applied thermal engineering*. 2025. Vol. 277. Article 127116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127116>.
- [22] Nial M., Loukarfi L., Naji H. Aerodynamic control of a diffusion flame to optimize materials' transition in a rotary cement kiln. *Mechanics & industry*. 2020. Vol. 21, no. 4. Article 414. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2020043>.
- [23] Swirled jet flame simulation and flow visualization inside rotary kiln-CFD with PDF approach / H. F. Elattar et al. *Processes*. 2020. Vol. 8, no. 2. Article 159. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8020159>.
- [24] Modelling of clinker cooler and evaluation of its performance in clinker cooling process for cement plants / J. S. Oyepata et al. *Nigerian journal of technology*. 2021. Vol. 39, no. 4. Pp. 1093-1099. DOI: <https://doi.org/10.4314/njt.v39i4.16>.
- [25] CFD modelling of meat and bone meal combustion in a cement rotary kiln – Investigation of fuel particle size and fuel feeding position impacts / Ariyaratne W. K. H., Malagalage A., Melaen M. C., Tokheim L.-A. *Chemical engineering science*. 2015. Vol. 123. Pp. 596-608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.10.048>.
- [26] Badzioch S., Hawksley P. G. W. Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles. *Industrial & engineering chemistry process design and development*. 1970. Vol. 9, no. 4. Pp. 521-530. DOI: <https://doi.org/10.1021/i260036a005>.
- [27] Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement / M. Milani et al. *Journal of environmental management*. 2017. Vol. 203. Pp. 1026-1037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.076>.
- [28] Martins M. A., Oliveira L. S., Franca A. S. Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns. *Fuel*. 2001. Vol. 80, no. 11. Pp. 1611-1622. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0016-2361\(01\)00032-1](https://doi.org/10.1016/s0016-2361(01)00032-1).
- [29] Soft sensing of calcination zone temperature of lime rotary kiln based on principal component analysis and stochastic configuration networks / Lian L., Zong X., He K., Yang Z. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*. 2023. Vol. 240. Article 104923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.104923>.
- [30] Tian Z., Yu X., Tang F. Soft-sensing model of calcination zone temperature of rotary kiln based on principal component analysis and leaky integrator echo state network. *Chemical engineering science*. 2025. Vol. 309. Article 121472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121472>.
- [31] Novel method for temperature prediction in rotary kiln process through machine learning and CFD / Y. Wang et al. *Powder technology*. 2024. Vol. 439. Article

119649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119649>.
- [32] Single-step prediction method of burning zone temperature based on real-time wavelet filtering and KELM / S. Lu et al. *Engineering applications of artificial intelligence*. 2018. Vol. 70. Pp. 142-148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.01.010>.
- [33] Research on a new method of multi-zone high temperature point tracking of rotary kiln surface temperature based on equal angle scanning / S. Dai et al. *Infrared physics & technology*. 2019. Vol. 103. Article 103078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103078>.
- [34] Dynamic analysis of the temperature and the concentration profiles of an industrial rotary kiln used in clinker production / Rodrigues D. C. Q., Soares Junior A. P., Costa Junior E. F., Costa A. O. S. *Anais da academia brasileira de ciências*. 2017. Vol. 89, no. 4. Pp. 3123-3136. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160661>.
- [35] Spang H. A. A dynamic model of a cement kiln. *Automatica*. 1972. Vol. 8, no. 3. Pp. 309-323. DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(72\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0005-1098(72)90050-7).
- [36] Boateng A. A., Barr P. V. A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed. *International journal of heat and mass transfer*. 1996. Vol. 39, no. 10. Pp. 2131-2147. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00272-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00272-3).
- [37] Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln / H. Liu et al. *Powder technology*. 2016. Vol. 287. Pp. 239-247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.007>.
- [38] A dynamical simulation model of a cement clinker rotary kiln / J. L. Svensen et al. *2024 European control conference (ECC)*, Stockholm, Sweden, 25-28 June 2024. Pp. 2162-2168. DOI: <https://doi.org/10.23919/ecc64448.2024.10590953>.
- [39] Tscheng S. H., Watkinson A. P. Convective heat transfer in a rotary kiln. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1979. Vol. 57. Iss. 4. Pp. 433-443. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450570405>.
- [40] Heat convection and radiation in flighted rotary kilns: A minimal model / L. Le Guen et al. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 95, no. 1. Pp. 100-110. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.22659>.
- [41] Agrawal A., Ghoshdastidar P. S. Computer Simulation of Heat Transfer in a Rotary Lime Kiln. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2018. Vol. 10, no. 3. Article 031008. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4039299>.
- [42] Watkinson A. P., Brimacombe J. K. Limestone calcination in a rotary kiln. *Metallurgical Transactions B*. 1982. Vol. 13, no. 3. Pp. 369-378. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02667752>.
- [43] Agustini S. S., Queck A., Specht E. Modeling of the Regenerative Heat Flow of the Wall in Direct Fired Rotary Kilns. *Heat Transfer Engineering*. 2008. Vol. 29, no. 1. Pp. 57-66. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630701677171>.
- [44] Recognition method of cement rotary kiln burning state based on Otsu-Kmeans flame image segmentation and SVM / Zhang R., Lu S., Yu H., Wang X. *Optik*. 2021. Vol. 243. Article 167418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167418>.
- [45] Chen H., Yan T., Zhang X. Burning condition recognition of rotary kiln based on spatiotemporal features of flame video. *Energy*. 2020. Vol. 211. Article 118656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118656>.
- [46] Recognition of the temperature condition of a rotary kiln using dynamic features of a series of blurry flame images / H. Chen et al. *IEEE transactions on industrial informatics*. 2015. Vol. 12, iss. 1. Pp. 148-157. DOI: <https://doi.org/10.1109/tii.2015.2500891>.
- [47] An accurate online prediction model for kiln head temperature chaotic time series / M. Lv et al. *IEEE access*. 2020. Vol. 8. Pp. 44288-44299. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2973642>.
- [48] Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks / A. I. Okoji et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Vol. 61, no. 7. Pp. 5097-5109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.010>.
- [49] Stadler K. S., Poland J., Gallestey E. Model predictive control of a rotary cement kiln. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19, no. 1. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.08.004>.

AREAS OF OPTIMIZATION OF ROTARY KILN OPERATION

Lentsov I.A.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7113-536X>, e-mail: lentsov_i_a@pstu.edu;

Umrikhin M.O.

postgraduate student, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3476-6767>, e-mail: umrikhin_m_o@aspirants.pstu.edu

Rotary kilns are essential thermal processing units widely used in various industrial sectors, including cement production, metallurgy, chemical engineering, and mineral processing. Their operational efficiency directly influences product quality, energy consumption, and environmental impact. Despite decades of technological advancement, rotary kilns remain

complex systems characterized by high energy losses, uneven temperature distribution, wear of refractory linings, and significant emissions of pollutants. These challenges necessitate continuous improvement and optimization of kiln design, operation, and control strategies. This review article aims to provide a comprehensive analysis of current approaches to optimizing rotary kiln performance. It synthesizes findings from recent scientific literature and industrial practices, focusing on key aspects such as thermal regime stabilization, fuel efficiency, structural improvements, and the integration of digital technologies. Particular attention is given to the role of the application of computational fluid dynamics (CFD) and mathematical modelling for predicting and controlling heat transfer and material flow. The article also explores the implementation of automated control systems, including the use of artificial intelligence (AI), machine learning (ML), and Internet of Things (IoT) technologies, which enable real-time monitoring and adaptive regulation of kiln parameters. These innovations contribute to reducing energy consumption, minimizing emissions, and extending equipment lifespan. Additionally, the review highlights ecological considerations, such as the reduction of NO_x and CO₂ emissions, and the transition to alternative fuels and raw materials. By identifying and categorizing the most effective optimization strategies, this study provides a valuable resource for researchers, engineers, and decision-makers seeking to enhance the performance and sustainability of rotary kiln operations. The article concludes with a discussion of current limitations and outlines promising directions for future research, including hybrid modelling approaches and predictive maintenance systems.

Keywords: rotary kilns, converter lime, limestone calcination, energy efficiency, computational fluid dynamics (CFD) predictive control.

References

- [1] V. Alcántara et al., "A study case of energy efficiency, energy profile, and technological gap of combustion systems in the Colombian lime industry," *Applied thermal engineering*, vol. 128, p. 393-401, 2018. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2017.09.018**.
- [2] Lori E. Apodaca. Lime (Data in thousand metric tons unless otherwise noted). [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lime.pdf>. Accessed on: July 04, 2025.
- [3] H. Piringer, "Lime shaft kilns," *Energy procedia*, vol. 120, pp. 75-95. 2017. doi: **10.1016/j.egypro.2017.07.156**.
- [4] A.A. Boateng, *Rotary kilns*. Elsevier, 2008. doi: **10.1016/b978-0-7506-7877-3.x5001-6**.
- [5] F.M. Lea, and P.C. Hewlett, *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2003. doi: **10.1016/B978-0-7506-6256-7.X5007-3**.
- [6] K.E. Peray, *The rotary cement kiln*. Chemical Publishing Co., New York, 1986.
- [7] I.A. Lentsov, and D.I. Lentsov, Analiz prakticheskoho yspolzovaniya shakhtnoho okhladytelia yzvesty konstruksyyi OOO SNPP «Yzvesta» v usloviyakh kombynata «AZOVSTAL» ["Analysis of the practical use of the lime cooler designed by OOO SNPP "Izvesta" in conditions of metallurgical plant "AZOVSTAL"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovsky State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 27, pp. 124-128, 2013. (Rus.)
- [8] I. Olsen, L. Skaarup Jensen, E. Jepsen, and E. Rodtnes Jørgensen, "Palnyk dlia podachi tverdoho, ridkoho abo hazopodibnoho palyva u zonu horinnia vypalivalnoi pechi" ["Burner for supplying solid, liquid, or gaseous fuel to the combustion zone of a kiln"]. *UA Patent 98625*; June 11, 2012. (Ukr.)
- [9] Palnyky dlia obertovykh pechei (Rotary kiln's burners). [Online]. Available: <https://en-sol.llc/gorelki/gorelki-dlya-vrashhayushihhsya-pechei/>. Accessed on: August 12, 2025.
- [10] V.S. Pikashov, L.N. Trocenko, and T.V. Vinogradova, "Udoskonalennia systemy opalennia obertovoi pe-chi dlia vypalu vohnetryvkoi hlyn" ["Improvement of the heating system of a rotary kiln for firing refractory clay"], in *Proc. of the XVI Int. Conf. «Heat Engineering and Energy in Metallurgy»*, Dnipropetrovsk, Ukraine, Oct. 4-6, 2011, pp. 168-169. (Ukr.)
- [11] O.M. Krekhovetskij, A.V. Sybirnyj, and M.A. Petrova, "Shliakhy pokrashchennia roboty obertovykh pechei dlia vypalu tsementnoho klinkeru z metoiu ekonomii vytraty enerhonosiiv" ["Revolving furnaces for the burning out cement clinker: ways of their work improvement with the aim of power carriers expense saving"], *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific bulletin of UNFU*, vol. 20.1, pp. 112-116, 2010. (Ukr.)
- [12] I. S. Larsson et al., "Kiln aerodynamics visualization of merging flow by usage of PIV and CFD with application to grate-kiln induration machines," in *7th Int. Conf. on CFD in the minerals and process industries CSIRO*, Melbourne, Australia, Dec. 9-11, 2009.
- [13] I.A.S. Larsson, E.M. Lindmark, T.S. Lundström, D. Marjavaara, and S. Töyrä, "Visualization of Merging Flow by Usage of PIV and CFD with Application to Grate-Kiln Induration Machines," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 5(4), pp. 81-89, 2013. doi: **10.36884/jafm.5.04.19464**.
- [14] I.A.S. Larsson, T.S. Lundström, and B.D. Marjavaara, "Calculation of kiln aerodynamics with two RANS turbulence models and by DDES," *Flow, turbulence and combustion*, vol. 94, no. 4, pp. 859-878, 2015. doi: **10.1007/s10494-015-9602-8**.
- [15] I.A.S. Larsson, E.M. Lindmark, T.S. Lundström, and G.J. Nathan, "Secondary flow in semi-circular ducts," *Journal of fluids engineering*, vol. 133, no. 10, article 101206, 2011. doi: **10.1115/1.4004991**.

- [16] D. Kumar, and A. Dewangan, "Computational fluid dynamics modelling of the rotary lime kiln," in *Proc. of the 26th National and 4th Int. ISHMT-ASTFE heat and mass transfer Conf.*, Tamil Nadu, December 17-20, 2021, pp. 1-6.
- [17] B.-J. R. Bisulandu, and F. Huchet, "Rotary kiln process: an overview of physical mechanisms, models and applications," *Applied thermal engineering*, vol. 221, article 119637, 2023. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2022.119637**.
- [18] Y. Zhang, and S. Wang, "Numerical simulation of flue gas recirculation in a lime rotary kiln," *Energy*, vol. 297, article 131098, 2024. doi: **10.1016/j.energy.2024.131098**.
- [19] D.A. Granados, F. Chejne, J.M. Mejía, C.A. Gómez, A. Berrío, and W.J. Jurado, "Effect of flue gas recirculation during oxy-fuel combustion in a rotary cement kiln," *Energy*, vol. 64, pp. 615-625, 2014. doi: **10.1016/j.energy.2013.09.045**.
- [20] A.H. Al-Abbas, and J. Naser, "Effect of chemical reaction mechanisms and nox modeling on air-fired and oxy-fuel combustion of lignite in a 100-kw furnace," *Energy & fuels*, vol. 26, no. 6, pp. 3329-3348, 2012. doi: **10.1021/ef300403a**.
- [21] H. Lin et al., "Green ammonia co-firing in cement rotary kiln: numerical investigation on clinker quality and NOx emission by gas-solid interaction," *Applied thermal engineering*, vol. 277, article 127116, 2025. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2025.127116**.
- [22] M. Nial, L. Loukarfi, and H. Naji, "Aerodynamic control of a diffusion flame to optimize materials' transition in a rotary cement kiln," *Mechanics & industry*, vol. 21, no. 4, article 414, 2020. doi: **10.1051/meca/2020043**.
- [23] H.F. Elattar, E. Specht, A. Fouda, S. Rubaiee, A. Al-Zahrani, and S.A. Nada, "Swirled jet flame simulation and flow visualization inside rotary kiln-CFD with PDF approach," *Processes*, vol. 8, no. 2, article 159, 2020. doi: **10.3390/pr8020159**.
- [24] J.S. Oyepata, M.A. Akintunde, O.A. Dahunsi, S.S. Yaru, and E.T. Idowu, "Modelling of clinker cooler and evaluation of its performance in clinker cooling process for cement plants," *Nigerian journal of technology*, vol. 39, no. 4, pp. 1093-1099, 2021. doi: **10.4314/njt.v39i4.16**.
- [25] W.K.H. Ariyaratne, A. Malagalage, M.C. Melaaen, and L.-A. Tokheim, "CFD modelling of meat and bone meal combustion in a cement rotary kiln – Investigation of fuel particle size and fuel feeding position impacts," *Chemical engineering science*, vol. 123, pp. 596-608, 2015. doi: **10.1016/j.ces.2014.10.048**.
- [26] S. Badzioch, and P.G.W. Hawksley, "Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles," *Industrial & engineering chemistry process design and development*, vol. 9, no. 4, pp. 521-530, 1970. doi: **10.1021/i260036a005**.
- [27] M. Milani, L. Montorsi, M. Stefani, R. Saponelli, and M. Lizzano, "Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement," *Journal of environmental management*, vol. 203, pp. 1026-1037, 2017. doi: **10.1016/j.jenvman.2017.03.076**.
- [28] M.A. Martins, L.S. Oliveira, and A.S. Franca, "Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns," *Fuel*, vol. 80, no. 11, pp. 1611-1622, 2001. doi: **10.1016/s0016-2361(01)00032-1**.
- [29] L. Lian, X. Zong, K. He, and Z. Yang, "Soft sensing of calcination zone temperature of lime rotary kiln based on principal component analysis and stochastic configuration networks," *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, vol. 240, article 104923, 2023. doi: **10.1016/j.chemolab.2023.104923**.
- [30] Z. Tian, X. Yu, and F. Tang, "Soft-sensing model of calcination zone temperature of rotary kiln based on principal component analysis and leaky integrator echo state network," *Chemical engineering science*, vol. 309, article 121472, 2025. doi: **10.1016/j.ces.2025.121472**.
- [31] Y. Wang, Y. Xu, X. Song, Q. Sun, J. Zhang, and Z. Liu, "Novel method for temperature prediction in rotary kiln process through machine learning and CFD," *Powder technology*, vol. 439, article 119649, 2024. doi: **10.1016/j.powtec.2024.119649**.
- [32] S. Lu, H. Yu, H. Dong, X. Wang, and Y. Sun, "Single-step prediction method of burning zone temperature based on real-time wavelet filtering and KELM," *Engineering applications of artificial intelligence*, vol. 70, pp. 142-148, 2018. doi: **10.1016/j.engappai.2018.01.010**.
- [33] S. Dai, H. Nie, W. Yi, Y. Yang, J. Li, and D. Li, "Research on a new method of multi-zone high temperature point tracking of rotary kiln surface temperature based on equal angle scanning," *Infrared physics & technology*, vol. 103, article 103078, 2019. doi: **10.1016/j.infrared.2019.103078**.
- [34] D.C.Q. Rodrigues, A.P. Soares Junior, E.F. Costa Junior, and A.O.S. Costa, "Dynamic analysis of the temperature and the concentration profiles of an industrial rotary kiln used in clinker production," *Anais da academia brasileira de ciências*, vol. 89, no. 4, pp. 3123-3136, 2017. doi: **10.1590/0001-3765201720160661**.
- [35] H.A. Spang, "A dynamic model of a cement kiln," *Automatica*, vol. 8, no. 3, pp. 309-323, 1972. doi: **10.1016/0005-1098(72)90050-7**.
- [36] A.A. Boateng, and P.V. Barr, "A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 39, no. 10, pp. 2131-2147, 1996. doi: **10.1016/0017-9310(95)00272-3**.
- [37] H. Liu, H. Yin, M. Zhang, M. Xie, and X. Xi, "Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln," *Powder technology*, vol. 287, pp. 239-247, 2016. doi: **10.1016/j.powtec.2015.10.007**.
- [38] J.L. Svensen, W.R.L. Da Silva, J. Pigazo Merino, D. Sampath, and J.B. Jørgensen, "A dynamical simulation model of a cement clinker rotary kiln," in 2024

- European control conference (ECC)*, Stockholm, Sweden, June 25-28, 2024, pp. 2162-2168. doi: **10.23919/ecc64448.2024.10590953**.
- [39] S.H. Tscheng, and A.P. Watkinson, "Convective heat transfer in a rotary kiln," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 57, iss. 4, pp. 433-443, 1979. doi: **10.1002/cjce.5450570405**.
- [40] L. Le Guen, M. Piton, Q. Hénaut, F. Huchet, and P. Richard, "Heat convection and radiation in flighted rotary kilns: A minimal model," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 95, no. 1, pp. 100-110, 2016. doi: **10.1002/cjce.22659**.
- [41] A. Agrawal, and P.S. Ghoshdastidar, "Computer Simulation of Heat Transfer in a Rotary Lime Kiln," *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 10, no. 3, article 031008, 2018. doi: **10.1115/1.4039299**.
- [42] A.P. Watkinson, and J.K. Brimacombe, "Limestone calcination in a rotary kiln," *Metallurgical Transactions B*, vol. 13, no. 3, pp. 369-378, 1982. doi: **10.1007/bf02667752**.
- [43] S.S. Agustini, A. Queck, and E. Specht, "Modeling of the Regenerative Heat Flow of the Wall in Direct Fired Rotary Kilns," *Heat Transfer Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 57-66, 2008. doi: **10.1080/01457630701677171**.
- [44] R. Zhang, S. Lu, H. Yu, and X. Wang, "Recognition method of cement rotary kiln burning state based on Otsu-Kmeans flame image segmentation and SVM," *Optik*, vol. 243, article 167418, 2021. doi: **10.1016/j.ijleo.2021.167418**.
- [45] H. Chen, T. Yan, and X. Zhang, "Burning condition recognition of rotary kiln based on spatiotemporal features of flame video," *Energy*, vol. 211, article 118656, 2020. doi: **10.1016/j.energy.2020.118656**.
- [46] H. Chen, X. Zhang, P. Hong, H. Hu, and X. Yin, "Recognition of the temperature condition of a rotary kiln using dynamic features of a series of blurry flame images," *IEEE transactions on industrial informatics*, vol. 12, iss. 1, pp. 148-157, 2015. doi: **10.1109/tii.2015.2500891**.
- [47] M. Lv, X. Zhang, H. Chen, C. Ling, and J. Li, "An accurate online prediction model for kiln head temperature chaotic time series," *IEEE access*, vol. 8, pp. 44288-44299, 2020. doi: **10.1109/access.2020.2973642**.
- [48] A.I. Okoji, A.N. Anozie, J.A. Omoleye, A.E. Taiwo, and F.N. Osuolale, "Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 7, pp. 5097-5109, 2022. doi: **10.1016/j.aej.2021.10.010**.
- [49] K.S. Stadler, J. Poland, and E. Gallestey, "Model predictive control of a rotary cement kiln," *Control Engineering Practice*, vol. 19, no. 1, pp. 1-9, 2011. doi: **10.1016/j.conengprac.2010.08.004**.
- Стаття надійшла 25.07.2025
Стаття прийнята 13.08.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Ленцов І. А., Умріхін М. О. Напрями оптимізації роботи обертових печей. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 160-173. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344892>.

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.518:62-50

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344904

МЕТОДИ КОРЕГУВАННЯ ПОТОЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

Сімкін О.І.	канд. техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9939-7866 , e-mail: a.i.simkin@mipolitech.education ;
Сокол С.П.	викладач, ВСП «Маріупольський фаховий коледж ДВНЗ «ПДТУ», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0457-4476 , e-mail: teacher152@mfk.ukr.education ;
Ісаєв А.Б.	ст. викладач, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5966-4886 , e-mail: andrii.isaiev@mipolitech.education ;
Койфман О.О.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2075-7417 , e-mail: aleksey.koyfman@mipolitech.education

Розглядається питання організації збору та обробки технологічної інформації в АСУ ТП в рамках функціонування інформаційної підсистеми АСУ ТП. Висвітлено основні проблеми, що виникають при розробці програмного забезпечення. Поставлені основні задачі дослідження, описані методи вирішення проблеми, проведено експерименти з вимірювання технологічних параметрів (температура, швидкість повітря) при різних значеннях керуючих впливів. Обрано та розроблено алгоритми фільтрації та корекції аналогових сигналів. Проведено ідентифікацію параметрів об'єкта за отриманими експериментальними даними, розроблено та протестовано декілька систем автоматичного керування, проаналізовано результати моделювання роботи САР та порівняно з реальними вимірами.

Ключові слова: АСКТП, об'єкт керування, ідентифікація, мікроконтролер, підсистема введення технологічної інформації.

Постановка проблеми

Один із найважливіших пріоритетів розвитку виробництва полягає в переході до його цифровізації.

У статті [1] представлені основні напрями цифровізації, які революціонізують виробництво:

1. Віртуальний інжиніринг як сучасний підхід до проєктування, налагодження та експлуатації процесів. Створення високотехнологічних виробів та виробництв є комплексною задачею, що включає наукові, проєктно-конструкторські, технологічні та виробничі аспекти. Віртуальний інжиніринг процесів включає як проєктування виробничого та додаткового обладнання, очисного устаткування, так і засобів та систем автоматизації технологічних процесів і екологічного моніторингу на всіх етапах виробництва.

2. Використання цифрових двійників у виробництві, що визначається тими характеристиками, які слід оптимізувати щодо самого виробу або технології його виробництва, з використанням симуляційних моделей у формі цифрових даних.

Технічне та програмне забезпечення автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП), без яких неможливі обидва напрями, включає декілька підсистем, але базовою є інформаційна

підсистема. Технологічні прориви у сфері моніторингу процесів, управління та промислової автоматизації суттєво сприяли підвищенню продуктивності промисловості і виробництва. Ключовим вимогам відповідає точний і ефективний механізм збору даних, що здійснюється за допомогою різноманітних датчиків, зокрема для збору, аналізу та сортування об'єктів і елементів.

Такі функції як опитування технологічної інформації, її обробка та передача на верхній рівень, реалізація управляючих дій зазвичай реалізовані в програмованих логічних контролерах (PLC), інші функції (отримання інформації, занесення в базу даних поточної інформації, обслуговування робочих місць оператора-технолога та оперативного персоналу АСУ ТП і т.д.) реалізовані на комп'ютерах верхнього рівня.

Структура і алгоритми функціонування цієї підсистеми істотно залежать від кількості вхідних сигналів, їх типів, подальшого використання в інших підсистемах. На сьогоднішній час є декілька невирішених питань, пов'язаних з роботою інформаційних систем:

1. Під час проєктування інформаційної підсистеми необхідно вибрати та реалізувати способи опитування датчиків, інтервали опитування для кожного сигналу чи групи сигналів, алгоритми обробки інформації, в

тому числі фільтрації. Зазвичай вимоги щодо реалізації способів опитування та алгоритмів обробки інформації замовниками АСУ ТП не сформульовані, а конкретні рекомендації виходять з досвіду експлуатації систем та не завжди обґрунтовані.

2. В процесі роботи АСУ ТП трапляються ситуації виходу з ладу датчиків основних технологічних параметрів чи іншого обладнання для передачі сигналу до контролера чи комп'ютера. В цьому випадку керування агрегатом переводять на ручний режим.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботі [2] автори описують методи обробки великих масивів даних, такі як спектральний аналіз, кореляційний аналіз і метод фільтрації сигналів. Ці методи застосовуються з використанням адаптивного алгоритму дискретизації, який вибирає лише екстремуми аналогового сигналу і фіксує час їхнього виникнення та амплітудні значення.

У статті [3] розглядаються моделі для обробки аналогових сигналів, які базуються на тригонометричних сплайнах. Обговорюється проблема перетворення аналогових сигналів в цифрову форму та їх наступної обробки. Виділяється клас сигналів з відомими диференціальними властивостями. Розглядається моделювання інформаційних сигналів за допомогою тригонометричних сплайнів, а також аналізуються переваги та недоліки цих сплайнів.

У роботі [4] розглядається створення функціонального і універсального логічного аналізатора, який може одночасно захоплювати і аналізувати 24 цифрових і 8 аналогових сигналів. Для забезпечення мобільності та універсальності пристрою, а також реалізації як локального, так і дистанційного доступу, передбачено декілька інтерфейсів.

У статті [5] досліджено вплив параметрів фільтра низьких частот на основну похибку перетворення при обробці аналогових сигналів аналого-цифровим перетворювачем. Встановлено, що процедура нормалізації сигналів передбачає повне або часткове усунення впливу перешкод під час одночасної обробки інформаційної частини сигналу.

Нова схема цифрової компенсації, що представлена в [6], призначена для вимірювання, оцінки та корекції лінійних, слабко змінюваних в часі аналогових помилок в аналого-цифрових перетворювачах з чергуванням частот. Схема цифрової компенсації розроблена з використанням передбачуваного алгоритму стабілізації біспряженого градієнта, що забезпечує ефективне обчислювальне рішення. Проведені чисельні експерименти підтвердили ефективність і досяжність запропонованого методу.

Останнім часом зафіксоване зростання інтересу до концепції цифрового двійника (ЦД) в промисловості та наукових колах, проте використовуються різні визначення цього терміну.

Так, робота [7] спрямована на консолідацію досліджень, оцінок та розвитку цієї теми з метою забезпечення наукової обґрунтованості майбутніх досліджень. За допомогою систематичного огляду літератури та тематичного аналізу біля ста публікацій про ЦД за останні роки автори надають характеристику цього концепту, виявляють прогалини у знаннях, що потребують подальших досліджень. У роботі визначені ключові напрямки майбутніх досліджень, включаючи переваги, етапи створення та розвитку ЦД, приклади застосування, технічні реалізації та інше.

Стаття [8] аналізує понад 50 попередніх публікацій, патентів та результатів досліджень, проведених провідними світовими компаніями, з метою узагальнення поточного стану досліджень та застосувань цифрових двійників. Автори зазначають, що найбільша популярність ЦД спостерігається у PHM (Prognostics and Health Management – прогнозування, діагностика та управління станом), де моделювання є основою цифрових двійників, а основною проблемою є кіберфізичний синтез. Автори вважають, що підвищення життєздатності цифрових двійників необхідно вирішити шляхом розробки єдиного методу моделювання ЦД.

В роботі [9] описано систему оптимального управління процесом безперервного розливання сталі на основі моделі цифрового двійника. Система призначена для скоординованої оптимізації та динамічного керування вторинним охолодженням та остаточним електромагнітним перемішуванням та складається з трьох взаємопов'язаних частин. По-перше, створюється тривимірна модель теплопередачі в реальному часі як цифровий двійник процесу теплопередачі при безперервному розливанні; для високої точності він калібрується в автономному режимі з використанням вимірювань температури поверхні та товщини оболонки. По-друге, відповідно до металургійних правил охолодження та перемішування оптимізуються узгоджено на основі встановленої моделі цифрового двійника та алгоритму оптимізації рою частинок хаосу. По-третє, охолодження та перемішування додатково динамічно контролюються для забезпечення стабільності якості. Після введення системи зменшились помилки діючої математичної моделі та помилки управління, що вплинуло на якість зливків.

При використанні штучного інтелекту для розв'язання складних проблем в промисловості підходи варіюються залежно від доступності досліджень і літератури, що накопичені в процесі вирішення аналогічних завдань. У статті [10] спочатку обговорюється пошук і вибір корисних досліджень і літератури. Якщо існують добре відомі дослідження у галузі штучного інтелекту (ШІ), наступним кроком стає вибір відповідної платформи ШІ. У протилежному випадку виникає основна перешкода – як інтегрувати знання в галузі виробництва та технології штучного інтелекту. В статті також наводиться рішення для цієї проблеми, яке дозволяє інженерам підприємств використовувати штучний

інтелект на повний обсяг, адаптуючи його для своїх потреб, а не покладаючись на фахівців з обробки даних.

В огляді [11] представлено своєчасне дослідження кількох нових архітектур нейронних мереж та методів навчання після короткого огляду основ нейронних мереж та деяких важливих пов'язаних з ними проблем. Оглядова література і обговорення, що супроводжує її, мають загальну цінність, що виходить далеко за рамки металургії сталі, і можна багато чого отримати від оцінки методів, що використовуються в інших галузях матеріалознавства і за її межами, щоб застосувати їх до чорної металургії.

Разом з цим, на думку авторів, є можливість розробити алгоритми управління об'єктом в замкнутому режимі протягом часу, достатнього для оперативної заміни вказаних вище технічних засобів.

Для вирішення вище вказаних задач був реалізований імітатор об'єкта управління, розроблений його цифровий двійник і оцінені на його базі алгоритми обробки та можливості видавати розрахований сигнал у випадку збою фізичного датчика.

Мета статті

Розробка алгоритмів обробки аналогових сигналів, що поступають в АСУ ТП, які включають в себе фільтрацію, корекцію та масштабування. Ідентифікація структури та параметрів об'єкта керування. Розробка системи автоматичного керування об'єктом на базі мікроконтролера. Розробка і випробування цифрового двійника об'єкта керування з використанням математичного моделювання.

Матеріали та методи

В якості узагальненого об'єкта дослідження використані фізична та математична модель комплексного технологічного агрегату, що включає в себе систему з двома ємностями (перша – власне агрегат, друга розглядається функціонально як димовий тракт), датчиками, для вимірювання технологічних параметрів та системою керування на основі мікроконтролера. Також розглядається цифровий двійник цього об'єкта. При розробці макету технологічного об'єкта автори керувалися наступними принципами:

- наявність декількох взаємозв'язаних технологічних параметрів (не менше 6-8), щоб можна було набрати достатню базу даних для побудови моделі;
- відносна простота реалізації макету без необхідності пошуку дефіцитних матеріалів або вироблення складних деталей;
- відносна дешевизна електронних компонентів та датчиків.

Результуюча структурна схема макету технологічного об'єкта представлена на рис. 1.

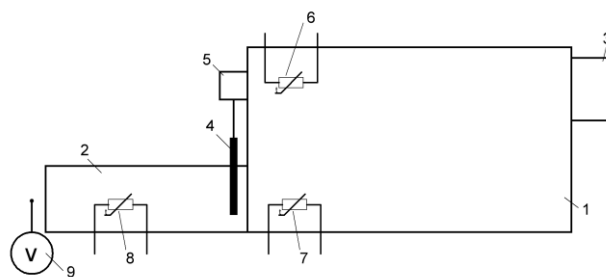


Рис. 1 – Схема макету технологічного об'єкта

Макет являє собою дві з'єднані ємності 1 та 2. Більша ємність представляє собою власне основний агрегат, де відбувається технологічний процес, а менша – димовий тракт, через який відводиться гаряче повітря. У крайній верхній частині агрегату (ємність 1) закріплений нагрівач повітря з вентилятором 3, який вдуває гаряче повітря всередину. Потужність як нагрівача, так і вентилятора контролюються та регулюються за допомогою мікроконтролера.

Між агрегатом 1 та димовим трактом 2 розташований шибєрний затвор 4, який дозволяє змінювати витрати повітря, що виходять з агрегату у димовий тракт. Положення шибєрного затвору регулюється за допомогою сервоприводу 5.

У макеті вимірюються наступні технологічні параметри:

- температура в двох точках робочого простору агрегату за допомогою термометрів опору типу Pt100 та температура в димовому тракті за допомогою аналогового термометру (8);
- швидкість повітря на виході з димового тракту за допомогою датчику 9;
- струм та напруга нагрівача повітря (на схемі не показані);
- струм та напруга вентилятора (на схемі не показані).

Всі сигнали від усіх датчиків заводяться у мікроконтролер серії RA2A1 компанії Renesas. Вибір саме такого контролера обумовлений його розвиненою аналоговою периферією. Він має п'ятиканальний 24-бітний сігма-дельта АЦП, а також 20-канальний 16-бітний АЦП послідовного наближення з п'ятьма диференційними каналами. Крім того, мікроконтролер має сучасне потужне 32-бітне ядро Cortex M23 і безліч цифрових інтерфейсів, що робить його ідеальним вибором для поставленої задачі і дозволяє відмовитися від зовнішніх модулів вводу-виводу.

Дослідним шляхом було встановлено, що для всіх аналогових параметрів, включаючи температуру, струм і напругу, достатньо 16-бітної точності.

Керування технологічним процесом та контроль параметрів відбувається за допомогою персонального комп'ютера, що підключається до мікроконтролера за допомогою інтерфейсу Segger RTT.

Оскільки потужність нагрівального елементу становить 100 Вт, для керування ним використовується твердотільне реле типу SSR-40 DD, яке має максимальний струм 40 А, що дає великий запас по допустимій потужності.

Виклад основного матеріалу

Було проведено декілька експериментів, щоб виявити взаємозв'язок параметрів між собою.

В першому експерименті спочатку шиберний затвор було закрито, а вентилятор і нагрівач працювали на повну потужність, через деякий час шибер було відкрито, а ще через деякий час нагрівач було вимкнено.

Результати експерименту представлені на рис. 2 – 6. Як можна побачити з цих рисунків, між багатьма параметрами є взаємозв'язок. Чітко прослідковується вплив положення шиберного затвору на температуру в агрегаті та димовому тракті (рис. 2, 3).

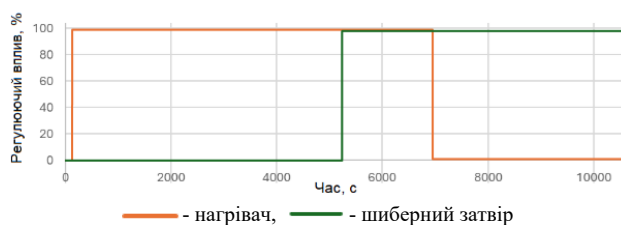


Рис. 2 – Положення шиберу та відносна потужність нагрівача

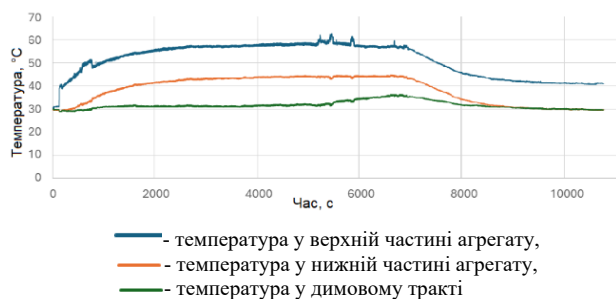


Рис. 3 – Температури в верхній та нижній частині агрегату та у димовому тракті

Поки шибер зачинено, температура в агрегаті росте швидко, причому у верхній частині вона значно більша, ніж у нижній. Це пов'язано з тим, що вентилятор-нагрівач також знаходиться у верхній частині, і створює потік повітря безпосередньо на термометр опору, а також з конвекційними процесами.

На рис. 4 можна помітити, що при вимкненні нагрівача потужність вентилятора незначно збільшується. Це пов'язано з підвищенням напруги блоку живлення при відключенні потужного споживача.

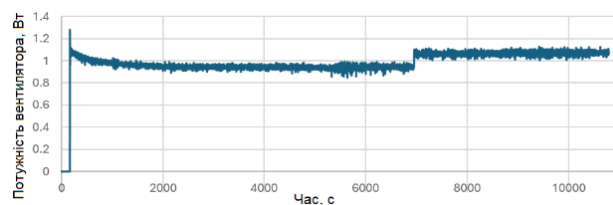


Рис. 4 – Потужність вентилятора

При відкриванні затвору температура в агрегаті незначно падає, а в димовому тракті починає зростати. Також зростає і швидкість повітря на виході. Можна помітити, що в цей момент також починає знижуватися потужність нагрівача (рис. 5).

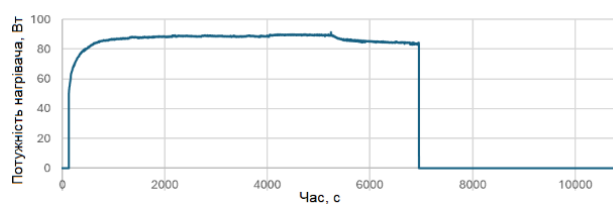


Рис. 5 – Потужність нагрівача

В димовому ж тракті температура майже не змінюється. Також видно, що швидкість повітря на виході з тракту (рис. 6) дуже мала і обумовлена негерметичністю затвору.

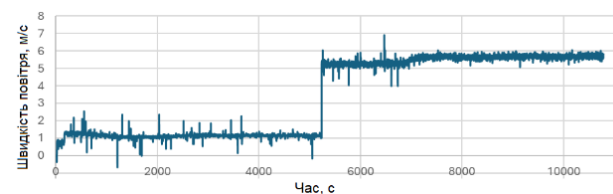


Рис. 6 – Швидкість повітря на виході з димового тракту

У другому експерименті була отримана залежність швидкості повітря від потужності вентилятора і положення шиберного затвору (рис. 7-9).

Швидкість повітря на виході з димового тракту значно залежить від положення шиберного затвору і слабо залежить від потужності вентилятора.

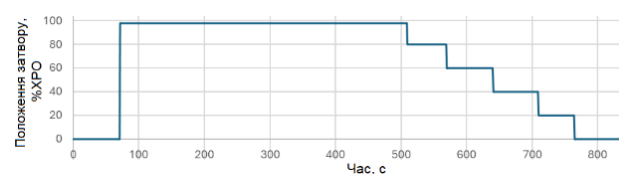


Рис. 7 – Положення шиберного затвору

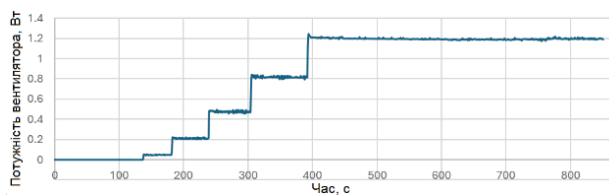


Рис. 8 – Потужність вентилятора

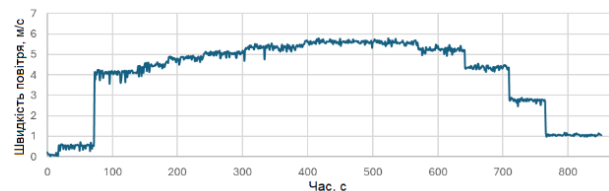


Рис. 9 – Швидкість повітря на виході з димового тракту

Щоб запобігти перегріву нагрівача, вентилятор крутиться на мінімальних обертах навіть при нульовому керуючому впливі, цим і обумовлена невелика швидкість повітря на початку графіків (рис. 5, 9)

Вимірювання температури та корекція

При використанні термометрів опору виявилася наступна проблема. Оскільки у вимірювальній схемі окрім власне термометру опору присутні ще звичайні резистори (навіть прецизійні), опір яких також залежить від температури навколишнього середовища, показання температури були нестабільними та неточними.

Для оцінки точності вимірювання та калібрування термометрів опору у схему були додані ще цифрові датчики температури типу DS18B20, які фізично розташовані всередині агрегату біля термометрів опору. То ж ми можемо вважати, що температури і зразкового (цифрового), і робочого (термометр опору) термометрів однакові.

Оскільки точність цифрових термометрів DS18B20, згідно з документацією, дорівнює $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ у всьому діапазоні вимірювання (від -55°C до 125°C), ми можемо вважати їх зразковими у порівнянні з термометрами опору.

Після першого тестування були отримані наступні результати (рис. 10). На графіку представлені показання термометру опору (синій графік) та цифрового термометру (фіолетовий графік) у нижній точці агрегату (див. рис. 1). Температури в інших точках мають якісно схожі графіки.

За графіком (рис. 10) видно, що показання термометру опору дуже зашумлені, а крім того, різниця між показаннями зразкового та робочого термометру сягає 5°C , що не є припустимим.

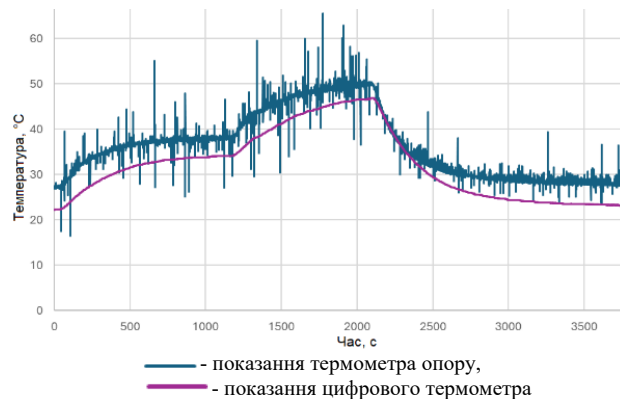


Рис. 10 – Результати вимірювань після першого випробування

Очевидно, що для усунення першої проблеми треба використовувати фільтрацію вхідних даних, а для усунення другої – провести калібрування датчика.

Було проведено декілька тестів з різними фільтрами – ковзне середнє, медіанний, аперіодичний, фільтр Калмана [12]. Найкращі результати були отримані за допомогою послідовного використання медіанного фільтра, який прибирав поодинокі викиди показань, та аперіодичного фільтра з коефіцієнтом фільтрації 0,1, який згладжував залишкові коливання. Фільтр Калмана, який вважається пристосованим як раз для фільтрації таких зашумлених показань, не дав значного покращення результатів, тож, враховуючи складність його реалізації, від нього було вирішено відмовитися. Результати застосування медіанного та аперіодичного фільтрів показані на рис. 11 та 12 відповідно.

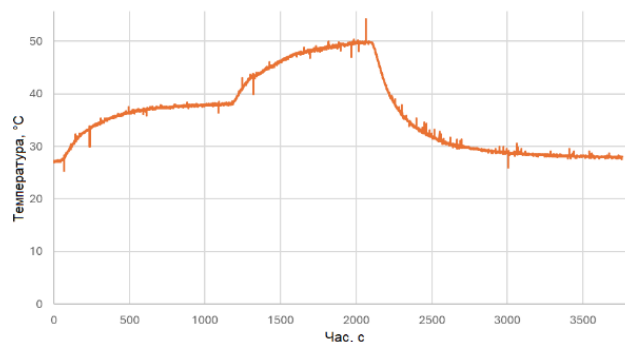


Рис. 11 – Результати застосування медіанного фільтра

Як можна бачити з рис. 11, вже після медіанного фільтра результати стають набагато кращими, ніж вихідні (рис. 10).

Аперіодичний фільтр майже повністю усуває коливання показань, роблячи їх придатними для подальшого зберігання та використання в системі індикації та регулювання.

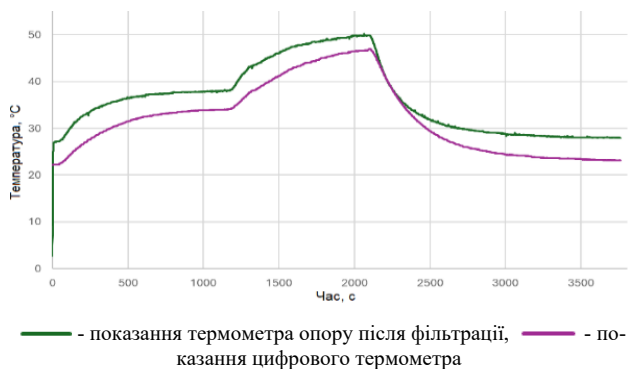


Рис. 12 – Результати застосування аперіодичного фільтра

Наступним кроком треба усунути різницю показань. Для цього треба ввести поправку на фільтровані показання термометру опору. Найпростіший варіант – це знайти різницю між показаннями зразкового та робочого термометрів у сталому стані, і віднімати її від кожного показання останнього. Графік різниці показань представлений на рис. 13.

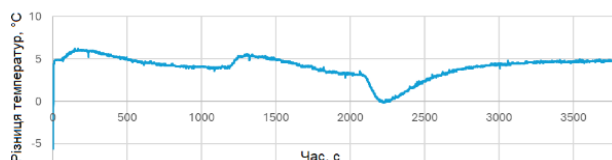


Рис. 13 – Різниця показань робочого та зразкового термометра

Початок графіка не є інформативним, оскільки показання спочатку сильно занижені аперіодичним фільтром (це також можна бачити і на рис. 12).

З рис. 13 можна побачити, що різниця між показаннями постійно змінюється, але у сталому стані вона близька до 5 градусів. При застосуванні такої поправки, ми отримаємо наступний результат (рис. 14).

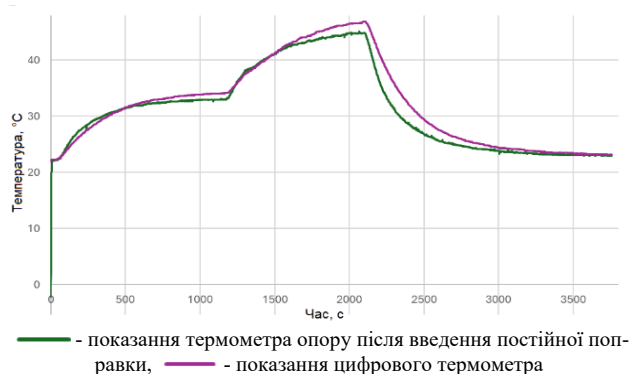


Рис. 14 – Результати вимірювання після введення постійної поправки

Тепер результати збігаються з досить непоганою точністю. Але в динамічних режимах показання все ж таки досить сильно розходяться. Це пов'язано з тим,

що фізично датчики мають різні геометричні розміри і різну конструкцію, то ж прогрів самих датчиків не є однаковим. Для подальших розрахунків ми будемо вважати, що показання цифрового термометру і в статичних, і в динамічних режимах є істинними.

Для того, щоб прибрати різницю показань в динамічному режимі треба ввести так звану динамічну поправку, що залежала б від швидкості зміни температури.

Цю швидкість ми будемо визначати, як різницю показань цифрового термометра за 30 секунд. Графік швидкості зміни температури представлений на рис. 15.

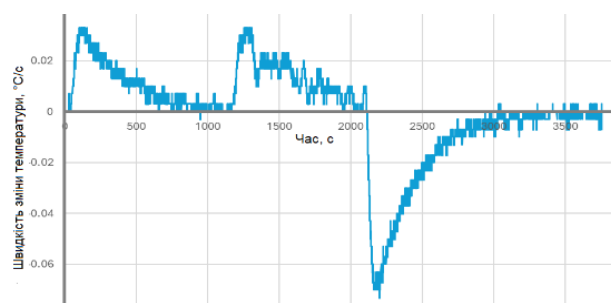


Рис. 15 – Швидкість зміни температури

Наступним кроком треба побудувати графік залежності різниці показань температур робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури (рис. 16).

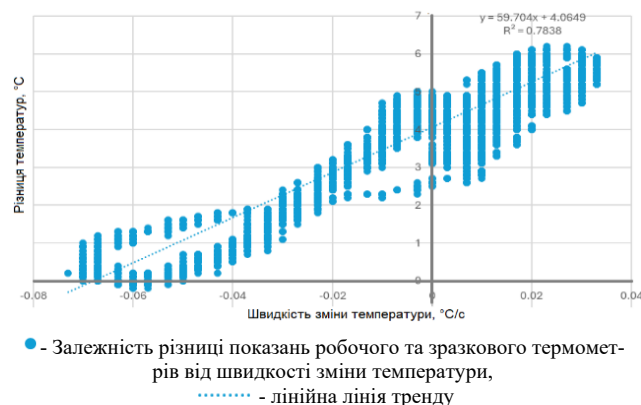


Рис. 16 – Залежність різниці показань робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури

З цього графіку видно, що залежність має характер, схожий на лінійний. Побудувавши лінію тренду, ми можемо отримати математичну залежність різниці показань температур робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури, яку потім можна застосувати до фільтрованих показань термометру опору. Ця лінія тренду, а її рівняння та коефіцієнт кореляції також показані на рис. 16. З цього рівняння, до речі, можна побачити, що при швидкості 0°C/хв

поправка складає $4,06^{\circ}\text{C}$, а не 5°C , як ми використовували на рис. 14.

Після введення динамічної поправки замість статичної, отримаємо наступний результат (рис. 17). Як можна бачити з цього рисунку, тепер показання сходяться з точністю не гірше 2°C . Після введення поправки значення робочого термометру стали більш шумними, що викликано тим, що швидкість також є досить зашумленою (рис. 15), а поправка залежить від швидкості у значній мірі (див. рівняння на рис. 16)



Рис. 17 – Результати вимірювання після введення динамічної поправки

Після тестування виявилося, що поправка також залежить від обертів вентилятора.

Тож, для того щоб врахувати ще й цей параметр, кінцеве рівняння для динамічної поправки було взято як лінійна апроксимація між рівняннями, отриманими методом, показаним на рис. 16, в залежності від обертів вентилятора.

Для інших двох термометрів були проведені аналогічні розрахунки та викладки. Результати вимірювання для температури у верхній частині агрегату наведені на рис. 18.



Рис. 18 – Результати вимірювання температури в верхній частині агрегату після введення динамічної поправки

Як бачимо з рис. 17 та 18, після математичної обробки показання зразкового та робочого датчиків

збігаються з точністю, що не перевищує 1°C в найгіршому випадку, а в більшості випадків – не більше $0,5^{\circ}\text{C}$.

Для інших двох термометрів були зроблені аналогічні обчислення і отримані подібні результати.

Вимірювання швидкості повітря та її корекція

Швидкість повітря (і пов'язані з нею витрати повітря) на відміну від температури є дуже динамічно змінюваним параметром. Тому при його вимірюванні та обробці треба, з одного боку, зменшити коливання показань, а з іншого боку – не допустити надмірного уповільнення його зміни через надто сильну фільтрацію.

Оскільки для датчика швидкості повітря немає ніякої можливості перевірити правдивість його показань, будемо вважати, що вони відповідають дійсності. Для цього датчика ми будемо обирати тип фільтра, а також перевіримо, як впливає частота опитування на результати вимірювання.

Для цього зробимо вимірювання з частотами 1000, 100, 10, 6, 4 та 1 вимірювань на секунду і застосуємо до вихідних результатів медіанний, аперіодичний фільтри та фільтр Калмана.

Оскільки швидкість змінюється дуже швидко, використання медіанного фільтра не дає помітного результату, як це було для температури, тому від нього було вирішено відмовитися.

Результати вимірювання та фільтрації для різних частот та коефіцієнтів фільтрації представлені на рис. 19-22. Тут жовтий графік – це вхідні дані, показання датчика, червоний графік – вихід аперіодичного фільтра, фіолетовий графік – вихід фільтра Калмана. Коефіцієнт фільтрації для обох фільтрів вказаний у назві графіків.

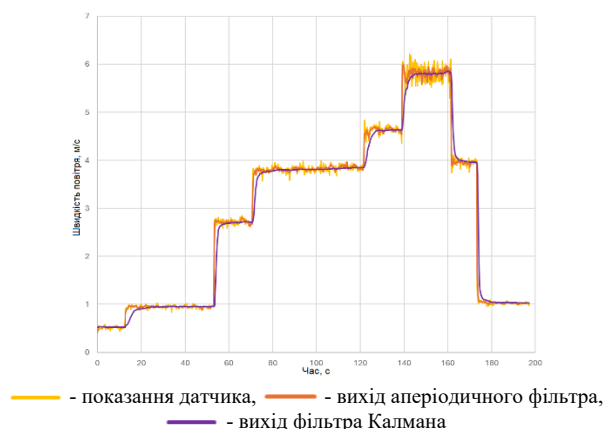


Рис. 19 – Результати при частоті опитування 1000 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,005

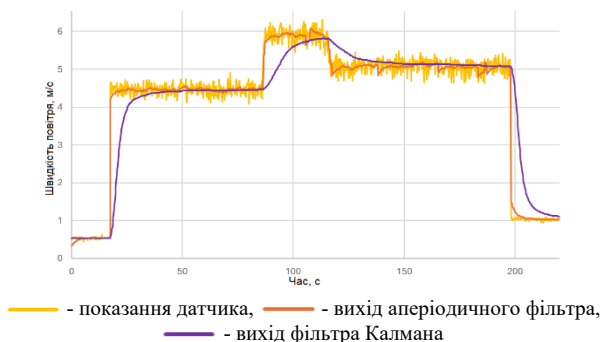


Рис. 20 – Результати при частоті опитування 100 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,005

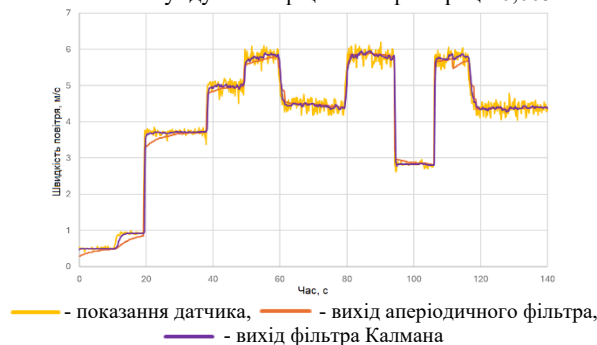


Рис. 21 – Результати при частоті опитування 10 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,5

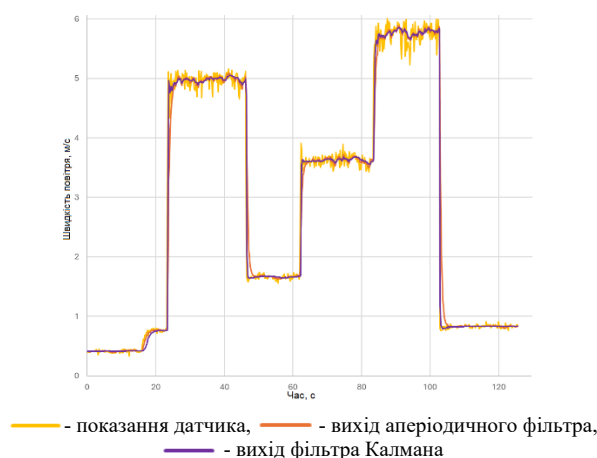


Рис. 22 – Результати при частоті опитування 1 вимірювання на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,5

З графіків виходить, що частота опитування досить слабо впливає на показання датчика. Якщо порівняти вхідні дані на рис. 19, де частота опитування 1000 раз на секунду і на рис. 22, де вона 1 раз на секунду, то помітної різниці між ними не видно. То ж для зменшення навантаження на мікроконтролер, що займається вимірюванням і обробкою даних, було вирішено проводити вимірювання 10 раз на секунду. Це значення було обрано тому, що ПІД-регулятор, який керує швидкістю повітря і який буде описаний далі,

працює з кроком 0,1 с, і має сенс мати на кожному кроці актуальне значення.

З іншого боку, результат дуже сильно залежить від коефіцієнта фільтрації. Якщо він недостатній, то отримані на виході фільтра значення будуть мати значні коливання (як на рис. 20, червоний графік), якщо ж він буде надто великим, то показання будуть сильно згладжені та не будуть відображати реальну картину зміни витрат повітря (як на рис. 20, фіолетовий графік). Тому треба обрати компромісне рішення, при якому коливання будуть усунені у достатній мірі, щоб регулятор міг впоратися з керуванням цим параметром, але водночас, щоб дані, що надходять на регулятор, були актуальні, а не затримані на 10-20 секунд, що є неприпустимим для такого швидкозмінного параметру.

Серед усіх графіків найбільше відповідає цим вимогам фільтр Калмана з коефіцієнтом 0,5 при частоті опитування 10 раз на секунду (фіолетовий графік на рис. 21). Він реагує на швидку зміну значення параметру швидше, ніж аперіодичний фільтр, і при усталеній швидкості краще відфільтровує викиди (див. графіки на рис. 21 в районі 110 с).

Ідентифікація параметрів об'єкту керування

Як вже було зазначено, в якості вихідних параметрів об'єкту керування, вважатимуться температура та швидкість повітря на виході з димового тракту.

Визначимо параметри об'єкту управління методом побудовання кривих розгону для різних величин. Температура головним чином визначається електричною потужністю, що подається на нагрівач, тому побудуємо залежність температури від часу при стрибкоподібній зміні потужності нагрівача від 0% до 100% і від 100% до 0% (рис. 23).

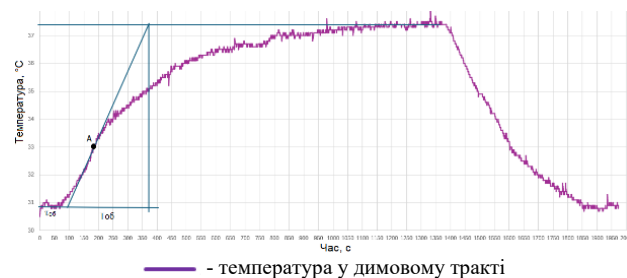


Рис. 23 – Крива розгону об'єкту керування за температурою у димовому тракті

Проведемо ідентифікацію параметрів об'єкту, представивши його статичним об'єктом керування першого порядку з запізненням. Передатна функція такого об'єкту

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{1+T_{об}p} e^{-p\tau_{об}}. \quad (1)$$

З рис. 23 можна визначити параметри об'єкту [13]: $K_{об} = 0,07^\circ\text{C}/\%\text{ШІМ}$, $T_{об} = 260$ с; $\tau_{об} = 100$ с.

Що стосується швидкості повітря, то вона залежить одразу від двох параметрів: потужності вентилятора та ступеню відкриття шиберної заслінки, причому, першим параметром можна регулювати

швидкість більш точно, але в більш вузькому діапазоні (± 1 м/с), в той час, як другий параметр дозволяє змінювати швидкість у всьому діапазоні, але з меншою точністю.

Аналогічним чином побудуємо криві розгону для цього параметру за двома каналами регулюючого впливу: ступеню відкриття заслінки та потужності вентилятора (рис. 24).

На рис. 24 перший стрибок швидкості обумовлений зміною положення шиберної заслінки від 0% до 100%, а другий – зміною потужності вентилятора від 0% до 100%.

Як бачимо, на зміну положення шиберної заслінки швидкість реагує практично миттєво, в той час, як при зміні потужності вентилятора встановлення нового значення займає деякий час, але дуже незначний.

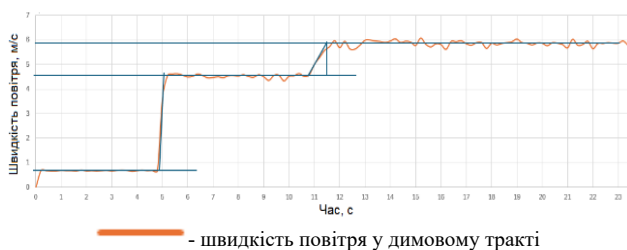


Рис. 24 – Крива розгону об'єкту керування за швидкістю повітря на виході з димового тракту

В даному випадку об'єкт за обома каналами керування можна вважати статичним із запізненням, і використовувати передатну функцію (1) тільки з наступними параметрами.

Параметри об'єкту керування при зміні положення шиберної заслінки: $K_{об} = 0,039$ м/с/%ХРО, $T_{об} = 0,15$ с, $\tau_{об} = 0,01$ с.

Параметри об'єкту керування при зміні потужності вентилятора: $K_{об} = 0,013$ м/с/%ШІМ; $T_{об} = 0,8$ с; $\tau_{об} = 0,2$ с.

Керування об'єктом за допомогою ПІД-регулятора

Знаючи параметри об'єкту управління за різними каналами керування, можна визначити параметри ПІД-регуляторів для кожного з цих каналів. Скористаємося формулами для визначення налаштувань регулятора інженерним методом для аперіодичного перехідного процесу:

$$K_p = \frac{0,95}{K_{об}T_{об}}; T_i = 2,4\tau_{об}; T_d = 0,4\tau_{об} \quad (2)$$

Для керування температурою будемо використовувати один ПІД-регулятор з наступними параметрами: $K_p = 35\%$ ШІМ/°С; $T_i = 40$ с; $T_d = 1$ с.

Для керування швидкістю повітря будемо використовувати наступний алгоритм: керування потужністю вентилятора буде відбуватися за допомогою ПІД-регулятора. При досягненні ним крайніх положень (0% чи 100%) буде на кожному кроці відбуватися відкриття або закриття заслінки на заданий відсоток. Така

система керування можлива за рахунок того, що параметри об'єкту за каналом регулювання шиберною заслінкою мають набагато меншу інерційність, ніж за каналом регулювання потужністю вентилятора. Тому перший регулятор можна замінити ПІ-регулятором, а другий залишити ПІД, і підтримувати ним точне значення швидкості повітря. Параметри цього ПІД-регулятора наступні: $K_p = 300\%$ ШІМ/м/с; $T_i = 0,48$ с; $T_d = 0,08$ с.

Відсоток відкриття шиберної заслінки при досягненні ПІД-регулятором крайніх положень буде підібрано експериментально, починаючи з 1%/крок.

Результати регулювання температури та швидкості з заданими параметрами представлені на рис. 25-28.

На рис. 25, 26 показаний процес регулювання температури. Спочатку було встановлено задане значення 32°С, а потім 25°С. Як можна бачити, процес регулювання є коливальним, причому коливання мають місце при утриманні більш високої температури. Значення в 25°С так і не було досягнуто бо регулятор чомусь намагався збільшити керуючий вплив (рис. 26).

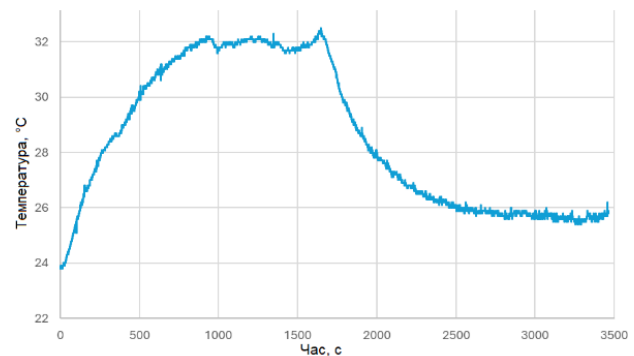


Рис. 25 – Результат регулювання температури на виході з димового тракту

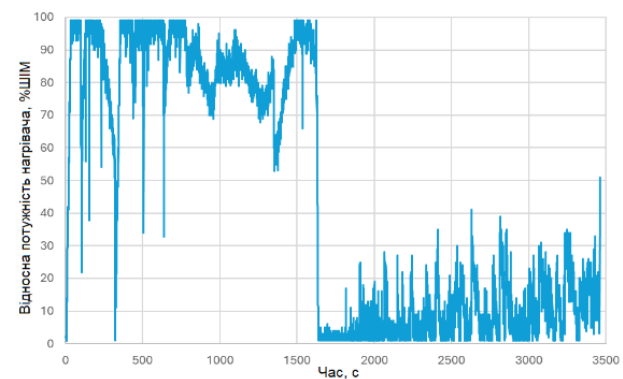


Рис. 26 – Потужність нагрівача при регулюванні температури

При регулюванні швидкості повітря процес також коливальний (рис. 27, 28), при цьому на малій заданій швидкості (1 м/с) коливання стають незатухаючими. Це говорить про те, що в налаштуваннях регулятора величина T_i є недостатньо великою і керуючий вплив

змінюється швидше, ніж регульована величина, причому це стосується обох параметрів. Для того, щоб підібрати T_i для обох регуляторів, будемо збільшувати їхні значення з певним кроком (0,5 с для регулятора швидкості повітря і 10 с для регулятора температури) і проводити експерименти з отримання перехідних процесів. В результаті досліджень було встановлено, що для регулятора температури найкращі результати отримуються при $T_i = 80$ с, а для регулятора швидкості повітря при $T_i = 3$ с.

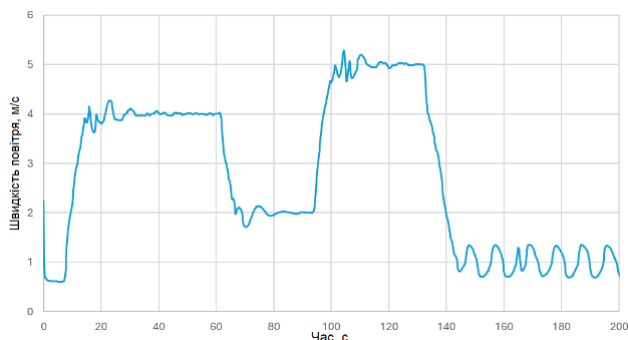


Рис. 27 – Процес регулювання швидкості повітря на виході з димового тракту



Рис. 28 – Положення шибєрної заслінки та потужність вентилятора при регулювання швидкості повітря

Результати представлені на рис. 29, 30.

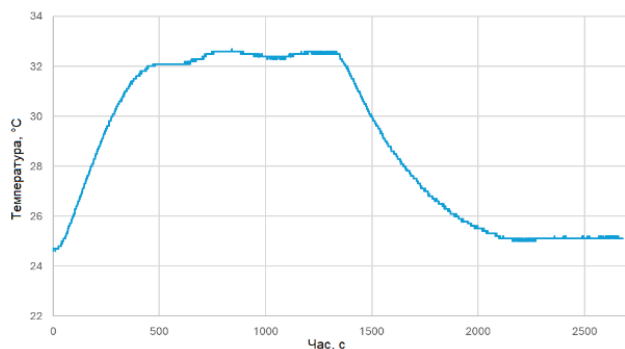


Рис. 29 – Результат регулювання температури на виході з димового тракту при збільшенні часу інтегрування регулятора

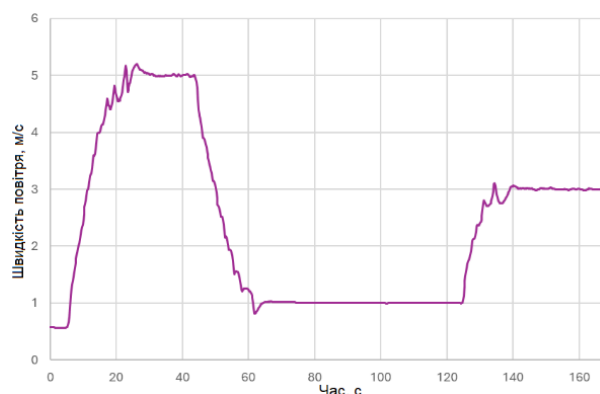


Рис. 30 – Процес регулювання швидкості повітря на виході з димового тракту при збільшенні часу інтегрування регулятора

Як видно з рис. 29, 30, якість регулювання температури та швидкості повітря значно покращилися. Процеси стали значно більше схожими на аперіодичні. При регулюванні швидкості температури коливання відбуваються лише в момент активної роботи обох регуляторів, коли змінюється положення шибєрної заслінки, а регулятор потужності вентилятора намагається компенсувати зміни швидкості повітря.

Створення математичної моделі об'єкту керування

Для математичного опису об'єкту управління можна використовувати декілька підходів.

1. На основі фізичного опису процесів, що відбуваються всередині об'єкту. Такий підхід може дати високу точність, але потребує доброго розуміння аеродинаміки та теплообміну і, окрім того, визначення певної кількості емпіричних коефіцієнтів.

2. На базі спрощеної математичної моделі, представивши об'єкт як сукупність елементарних ланок. Такий підхід має меншу точність, але при правильному знаходженні параметрів ланок та механізму їх зв'язку може дати добрий результат.

3. На базі штучної нейронної мережі. В такому випадку треба зробити велику кількість вимірювань при різних значеннях регулюючих параметрів, щоб набрати достатню кількість даних для навчання мережі. Враховуючи велику інерційність об'єкту за температурою, це може зайняти велику кількість часу.

Автори обрали другий варіант, який є відносно простим, але дає достатню точність, то ж може слугувати добрим прикладом створення цифрового двійника об'єкта керування.

При побудові моделі для спрощення будемо вважати, що температура в об'єкті та в димовому боріві здебільшого залежить від поточної потужності нагрівача, а швидкість повітря на виході залежить в рівній мірі і від положення заслінки, і від потужності вентилятора.

Раніше були визначені параметри об'єктів при представленні їх в якості послідовного з'єднання апериодичної ланки та ланки запізнення. Для швидкості повітря такий підхід є виправданим через невелику інерційність. А для температури треба додати ще одну апериодичну ланку з коефіцієнтом передачі 1, але з додатковою постійною часу T_2 , щоб врахувати сильну інерційність цього параметру. Величину T_2 було знайдено емпіричним шляхом.

Таким чином, передатна функція об'єкту за каналом температури

$$W_T(p) = \frac{K_T}{T_{T1}p+1} \frac{1}{T_{T2}p+1} e^{-p\tau_T}, \quad (3)$$

а за каналом швидкості повітря

$$W_{\Pi}(p) = \frac{K_{\Pi 3}}{T_{\Pi 3}p+1} e^{-p\tau_{\Pi 3}} + \frac{K_{\Pi 6}}{T_{\Pi 6}p+1} e^{-p\tau_{\Pi 6}}, \quad (4)$$

де K_m , T_{m1} , T_{m2} та τ_m – відповідно, коефіцієнт передачі, постійні часу та час запізнення об'єкту за каналом потужності нагрівача – температура;

$K_{\Pi 3}$, $T_{\Pi 3}$, та $\tau_{\Pi 3}$ – відповідно, коефіцієнт передачі, постійна часу та час запізнення об'єкту за каналом положення заслінки – швидкість повітря;

$K_{\Pi 6}$, $T_{\Pi 6}$, та $\tau_{\Pi 6}$ – відповідно, коефіцієнт передачі, постійна часу та час запізнення об'єкту за каналом потужності вентилятора – швидкість повітря.

При підставленні значень параметрів, отриманих раніше, отримаємо наступні результати моделювання (рис. 31, 32).

Як можна бачити з рис. 31 та 32, результати моделювання та реальні дані сильно відрізняються. Шляхом додаткових експериментів було виявлено, що параметри об'єкту є сильно нелінійними. Тож було вирішено зробити модель зі змінними параметрами. Для цього було побудовано декілька кривих розгону при зміні потужності нагрівача та вентилятора і положення заслінки не з кроком 100%, а з кроком 20%.

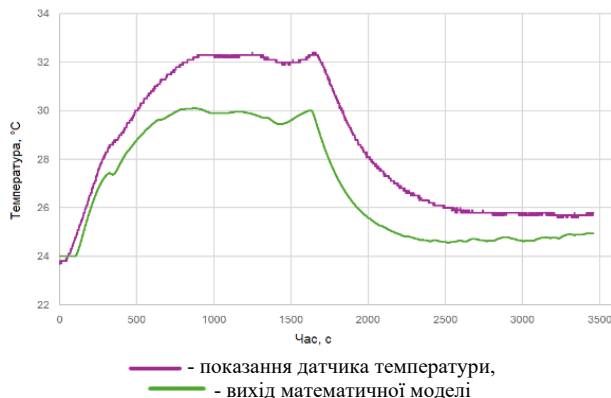


Рис. 31 – Порівняння реальної температури повітря в димовому тракті з результатами моделювання

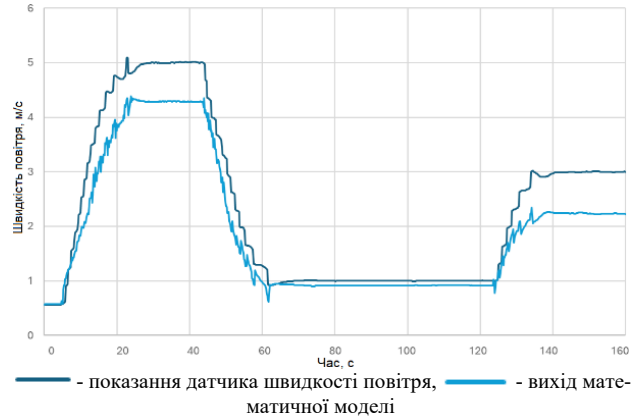


Рис. 32 – Порівняння реальної швидкості повітря на виході з димового тракту з результатами моделювання

В результаті було знайдено параметри об'єктів для різних діапазонів керуючих впливів. При їх підставленні в моделі (3) та (4) було отримано наступні результати моделювання (рис. 33, 34).

Як видно з рис. 33 та 34, при використанні змінних параметрів об'єкту результати моделювання наближаються до реальних значень з досить високим ступенем точності. В цій спрощеній моделі використовувалися лише залежності між параметрами та найбільш впливовими керуючими впливами, але якщо додати в формули (3) та (4) всі керуючі впливи, можна отримати ще більш точне наближення результатів моделювання до реальних значень.

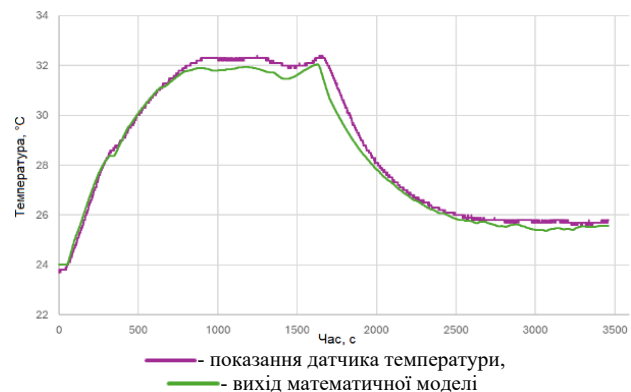


Рис. 33 – Порівняння реальної температури повітря в димовому тракті з результатами моделювання при змінних параметрах об'єкту



Рис. 34 – Порівняння реальної швидкості повітря на виході з димового тракту з результатами моделювання при змінних параметрах об'єкту

Висновки

Наукова новизна:

1. Запропоновано вводити динамічну поправку для вимірювання температури, в залежності від швидкості її зміни.
2. Розроблено адаптивну математичну модель із змінними параметрами на основі діапазону керуючих впливів.
3. Застосовано комбінацію методів фільтрації, корекції та математичного моделювання для створення та тестування цифрового двійника технологічного агрегату з термо- та аеродинамічними процесами.

Теоретичні результати:

1. Показано доцільність використання фільтра Калмана для швидкозмінних параметрів і комбінації медіанного та аперіодичного фільтрів для повільнозмінних параметрів.
2. Показано доцільність використання динамічних поправок з урахуванням швидкості зміни параметру для повільнозмінних параметрів.
3. Розроблено математичну модель об'єкта керування у вигляді сукупності елементарних ланок.

Практичні результати:

1. Створено фізичний макет технологічного об'єкта.
2. Реалізовано систему збору та обробки аналогових сигналів.
3. Встановлено методи корекції похибок температури з урахуванням динаміки та величини керуючих впливів.
4. Впроваджено ПІД-регулятори для керування технологічним процесом.
5. Досягнута точність температурних вимірювань до 0,5-1°C.

Перелік використаних джерел

- [1] Дорошенко В. С. Топологічна оптимізація конструкцій виливків при адитивному виробництві з застосуванням цифрового двійника. *Процеси*

лиття. 2020. № 4 (142). С. 53-62. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2020.04.053>.

- [2] Гриценко В., Скурихін В., Цепков Г. Інформаційні технології цифрової обробки сигналів: нові підходи і перспективи впровадження. *Вісник Національної академії наук України*. 2005. № 12. С. 33-41.
- [3] Негоденко О. В. Моделі для обробки інформаційних сигналів на основі тригонометричних сплайнів. *Зв'язок*. 2018. № 4. С. 47-50.
- [4] Алдохін М. Д. Логічний аналізатор сигналів на ПЛІС. *Електронна та акустична інженерія*. 2020. Т. 3. № 4. С. 38-43. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2020.3.4.199926>.
- [5] Рязанцев О. І., Кардашук В. С., Рязанцев А. О. Дослідження впливу параметра фільтра на якість аналого-цифрового перетворення сигналу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2020. № 7 (263). С. 29-34. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-29-34>.
- [6] Digital Estimation and Compensation of Analog Errors in Frequency-Interleaved ADCs / J. Song et al. *Journal of Circuits, Systems and Computers*. 2019. Vol. 28. Pp. 35-42. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218126619501342>.
- [7] Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones et al. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 29, part A. Pp. 36-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
- [8] Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15, iss. 4. Pp. 2405-2415. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
- [9] Digital-Twin-Based Coordinated Optimal Control for Steel Continuous Casting Process / Yang J., Ji Z., Liu W., Xie Z. *Metals*. 2023. Vol. 13(4). Article 816. Pp. 123-143. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13040816>.
- [10] Kanokogi H. AI in the Process Industry. *Yokogawa Technical Report (Engl. Ed.)*. 2021. Vol. 64, no. 1. Pp. 53-60.
- [11] Smith J. L. Advances in neural networks and potential for their application to steel metallurgy. *Materials Science and Technology*. 2020. Vol. 36, iss. 17. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2020.1839206>.
- [12] Шилов Д., Ямненко Ю. Система дистанційного моніторингу ваги для бджільництва. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2022. Т. 27, № 3. С. 267186-1 – 267186-7. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.267186>.
- [13] Койфман О., Мірошніченко В., Сімкін О. Аналітичне дослідження методів ідентифікації об'єкта керування. *MiningMetalTech 2023 – The Mining and Metals Sector: Integration of Business, Technology and Education: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2023. С. 113-147. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-7>.

METHODS OF CORRECTION OF CURRENT VALUES OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

Simkin O.I.	PhD (Engineering), professor, Technical University «Metinvest Polytechnic» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9939-7866 , e-mail: a.i.simkin@mipolitech.education ;
Sokol S.P.	lecturer, Separate structural unit «Mariupol Vocational College of the SHEI «PSTU», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0457-4476 , e-mail: teacher152@mfk.ukr.education ;
Isaiev A.B.	senior lecturer, Technical University «Metinvest Polytechnic» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5966-4886 , e-mail: andrii.isaiev@mipolitech.education ;
Koyfman O.O.	канд. техн. наук, доцент, Technical University «Metinvest Polytechnic» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2075-7417 , e-mail: aleksey.koyfman@mipolitech.education

The issue of organizing the collection and processing of technological information in an automated process control system (APCS) within the framework of its information subsystem operation is considered. The main tasks that arise during the development of software for the information subsystem are highlighted: determining the sensor polling time, selecting signal averaging methods, and selecting filtering algorithms. Based on the review of scientific articles, the current state of these issues has been assessed. The purpose of the study has been defined, the methods for solving the tasks have been described, and a physical prototype of a nominal technological object has been created. A system for collecting and processing analog signals has been implemented, and experiments have been conducted to measure technological parameters (temperature, air velocity) under various values of control actions. Algorithms for filtering and correcting analog signals have been selected. Methods for correcting temperature errors, accounting for the dynamics and magnitudes of control actions, have been established. A combination of filtering, correction, and mathematical modeling methods has been applied to create and test a digital twin of a technological unit with thermal and aerodynamic processes. The expediency of using a Kalman filter for rapidly changing parameters and a combination of a median filter and an aperiodic filter for slowly varying parameters has been demonstrated. The expediency of applying dynamic corrections that account for the rate of change of slowly varying parameters has also been demonstrated. An adaptive mathematical model with variable parameters, based on the range of control actions, has been developed in the form of a set of elementary links. The object parameters have been identified using the obtained experimental data; several variants of automatic control systems have been developed and tested; and the results of control system simulation have been analyzed.

Keywords: APCS, control object, identification, microcontroller, technological information input subsystem.

References

- [1] V.S. Doroshenko, "Topologichna optymizatsiia konstruktivnykh vylyvkiv pry adyativnomu vyrobnytstvi z zastosuvanniam tsyfrovoho dviinyka" ["Topological optimization of castings designs in additive production using a digital twin"], *Protsezy lyttia – Casting Processes*, № 4(142), pp. 53-62, 2020. doi: **10.15407/plit2020.04.053**. (Ukr.)
- [2] V. Hrytsenko, V. Skurykhin, and H. Tsepkov, "Informatsiini tekhnologii tsyfrovoy obrobky syhnaliv: novi pidkhody i perspektyvy vprovadzhennia" ["Information technologies of digital signal processing: new approaches and prospects for implementation"], *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, № 12, pp. 33-41, 2005. (Ukr.)
- [3] O. V. Negodenco, "Modeli dlia obrobky informatsiinykh syhnaliv na osnovi tryhometrychnykh splainiv" ["Models for processing of information signals based on trigonometric splines"], *Zviazok – Connectivity*, № 4, pp. 47-50, 2018. (Ukr.)
- [4] M. Aldokhin, "Lohichnyi analizator syhnaliv na PLIS" ["FPGA Logic Analyzer"], *Elektronna ta akustychna inzheneriia – Electronic and Acoustic Engineering*, vol. 3, № 4, pp. 38-43, 2020. doi: **10.20535/2617-0965.2020.3.4.199926**. (Ukr.)
- [5] O.I. Ryazantsev, V.S. Kardashuk, A.O. Ryazantsev, "Doslidzhennia vplyvu parametra filtra na yakist analoho-tsyfrovoho peretvorennia syhnalu" ["Study of the influence of the filter parameter on the quality of analog-to-digital signal conversion"], *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnyk of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, № 7 (263), pp. 29-34, 2020. doi: **10.33216/1998-7927-2020-263-7-29-34**. (Ukr.)
- [6] J. Song et al, "Digital Estimation and Compensation of Analog Errors in Frequency-Interleaved ADCs," *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 28, pp. 35-42, 2019. doi: **10.1142/S0218126619501342**.
- [7] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, "Characterising the Digital Twin: A systematic literature review," *CIRP Journal of Manufacturing Science*

and Technology, vol. 29, part A, Pp. 36-52, 2020. doi: **10.1016/j.cirpj.2020.02.002**.

- [8] F. Tao, H. Zhang, A. and A.Y.C. Liu, Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*," vol. 15, iss. 4, pp. 2405-2415, 2019. doi: **10.1109/TII.2018.2873186**.
- [9] J. Yang, Z. Ji, W. Liu, and Z. Xie, "Digital-Twin-Based Coordinated Optimal Control for Steel Continuous Casting Process," *Metals*, vol. 13(4), article 816, pp. 123-143, 2023. doi: **10.3390/met13040816**.
- [10] H. Kanokogi, "AI in the Process Industry," *Yokogawa Technical Report (Engl. Ed.)*, vol. 64, no. 1, pp. 53-60, 2021.
- [11] J.L. Smith, "Advances in neural networks and potential for their application to steel metallurgy," *Materials Science and Technology*, vol. 36, iss. 17, 2020. doi: **10.1080/02670836.2020.1839206**.
- [12] D.Yu. Shylov, S. Yamnenko, "Systema dystantsiinoho monitorynhu vahy dlia bdzhilnytstva" ["System of Remote Weight Monitoring for Beekeeping"],

Mikrosystemy, elektronika ta akustyka – Microsystems, Electronics and Acoustics, vol. 27, № 3, pp. 267186–1 – 267186–7, 2022. doi: **10.20535/2523-4455.me.267186**. (Ukr.)

- [13] O.O. Koifman, V.I. Miroshnychenko, O.I. Simkin, "Analychne doslidzhennia metodiv identyfikatsii obiekta keruvannia" ["Analytical study of methods of identification of control object"], in *MiningMetalTech 2023 – The Mining and Metals Sector: Integration of Business, Technology and Education: Scientific monograph*, Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2023, pp. 113-147. doi: **10.30525/978-9934-26-382-8-7**. (Ukr.)

Стаття надійшла 12.08.2025

Стаття прийнята 30.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Методи корегування поточних значень технологічних параметрів в автоматизованих системах керування / Сімкін О. І., Сокол С. П., Ісаєв А. Б., Койфман О. О. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 174-187. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344904>.

АНАЛІЗ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Поливода В.В.

канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-7742-255X>, e-mail: polyvodavv@gmail.com;

Самойлов С.О.

здобувач ступеня PhD, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID:
<https://orcid.org/0009-0006-4454-0510>, e-mail: samoilovserhii.ksma@gmail.com

Робота зосереджена на дослідженні сучасних технологій оптимізації суднових систем електропостачання суден. У ній розглянуто проблеми та фактори, що сприяють прогресу в цій галузі, такі як вплив морської галузі на навколишнє середовище та постійне зростання конкуренції. Наведено приклади найефективніших технологічних досягнень, включаючи світлодіодні системи освітлення, енергоефективні електродвигуни, частотно-регульовані приводи та гібридні джерела живлення. Проаналізовано стратегії, спрямовані на сприяння раціональному та відповідальному споживанню енергії, з ефективним управлінням системами накопичення енергії. Значна увага приділяється інтеграції альтернативних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, та їх потенціалу для сприяння декарбонізації судноплавства та зменшення залежності від традиційних видів палива. Гібридні рушійні установки, системи рекуперації відпрацьованого тепла та сучасні системи управління енергетичним обладнанням досліджуються як комплексні та інтегровані підходи до оптимізації споживання енергії на судах. Відзначається швидкий розвиток рішень для систем накопичення енергії, таких як літій-іонні акумулятори, які є дуже важливими для забезпечення ефективної та надійної роботи гібридних та повністю електричних суден з єдиною уніфікованою електроенергетичною системою. У статті наведено порівняльний аналіз розглянутих підходів до оптимізації на основі ключових критеріїв, таких як економія палива, рівень скорочення викидів, загальна надійність та економічна доцільність впровадження. Крім того, у статті ілюструється успішне застосування цих стратегій оптимізації на різних типах суден, від малих поромів до великих контейнеровозів та круїзних лайнерів. В окремому розділі представлено огляд останніх наукових досліджень та публікацій у цій галузі, а також майбутні тенденції та напрямки розвитку в оптимізації енергетичних систем суден, включаючи зростаючу роль цифровізації, автоматизації, використання штучного інтелекту, впровадження альтернативних видів палива.

Ключові слова: суднові автоматизовані електроенергетичні системи, енергоефективність, вплив на навколишнє середовище, оптимізація, цифровізація, альтернативні види палива, морський транспорт, електричні судна.

Постановка проблеми

Судноплавство та перевезення вантажів морським шляхом відіграє ключову роль у глобальній економіці. Морська індустрія стикається з нагальною потребою в оптимізації роботи суднових автоматизованих електроенергетичних систем (САЕЕС) для одночасного задоволення зростаючих експлуатаційних вимог, дотримання жорстких екологічних стандартів та мінімізації експлуатаційних витрат. Це зумовлено низкою факторів, серед яких посилення екологічних норм, таких як EU ETS, FuelEU Maritime та суворі вимоги Міжнародної морської організації (ІМО) щодо скорочення викидів CO₂ від суден. Крім того, до тиску конкуренції додається нестабільність цін на паливо, що робить питання оптимізації енергоспоживання особливо актуальним з економічної точки зору. Технології енергоефективності являються ключовим інструментом для досягнення цих цілей, оскільки ефективне використання енергії має значний потенціал для економії палива та зменшення викидів. Існуючі підходи до оптимізації часто мають свої обмеження та недоліки, а зростаюча складність суден з енергоємними системами вимагає розробки та впровадження більш інтегрованих та ефективних підходів до управління енергією [1].

Таким чином, дослідження та впровадження сучасних технологій, пов'язаних з САЕЕС, є вкрай важливим для забезпечення екологічної безпеки та економічної ефективності морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні дослідження в галузі розвитку САЕЕС демонструють значний інтерес до підвищення енергоефективності, зменшення викидів та інтеграції новітніх технологій. Аналіз наукових публікацій показує, що науковці підходять до цієї задачі з різних сторін, від моделювання та оптимізації існуючих систем до розробки та впровадження нових рішень.

Одним з ключових напрямків є створення та оптимізація моделей САЕЕС. Використовуються як фізичні моделі, так і керовані даними підходи для аналізу продуктивності. Фізичне моделювання базується на математичних рівняннях, що описують поведінку компонентів системи, в той час як кероване даними моделювання використовує машинне навчання для прогнозування та оптимізації на основі зібраних даних. Застосування таких інструментів, як діаграми Санкея, допомагає візуалізувати потоки енергії та виявляти області найбільших втрат для їх подальшої оптимізації [1].

Значна увага приділяється питанню оптимального використання енергії та розробці ефективних стратегій її використання. Розглядаються різні технології, які спрямовані на мінімізацію споживання палива. Наприклад, сучасні системи управління енергією (EMS) на основі оптимізаційних алгоритмів забезпечують значну економію палива та зменшення викидів. Також широко розповсюджуються системи, основані на гібридних пропульсивних установках та інтелектуальному керуванні [2, 3].

Іншим важливим напрямком є інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, разом з системами зберігання енергії. Дослідження спрямовані на розробку ефективних способів використання цих джерел для живлення бортових систем, підтримки пропульсії та зменшення залежності від традиційних видів палива.

Крім того, розглядаються технології утилізації відпрацьованого тепла, наприклад, такі як котли-утилізатори та системи органічного циклу Ренкіна, як засоби підвищення загальної енергоефективності судна.

Останні публікації також підкреслюють важливість цифровізації та використання штучного інтелекту для оптимізації суднових енергетичних систем. Технологія цифрових двійників та алгоритми машинного навчання можуть бути використані для прогнозування енергоспоживання, оптимізації роботи обладнання та прийняття більш оптимальних рішень щодо управління енергією [4].

Незважаючи на постійний та значний прогрес, дослідження також виявляють певні обмеження та виклики. До них належать обмежене використання керованих даними моделей для оптимізації, недостатня експериментальна валідація моделей, а також необхідність врахування невизначеності та проведення комплексної багатокритеріальної оптимізації, що охоплює основні важливі питання, включаючи витрати, викиди, надійність та безпеку. Також одна з основних глобальних проблем полягає у складності інтеграції нових підходів та технологій з вже існуючим обладнанням.

Мета статті

Мета даної роботи полягає у проведенні аналізу сучасних технологій, дотичних до роботи САЕЕС. В рамках дослідження розглянуто досягнення в цій сфері, експлуатаційні стратегії, інтеграцію альтернативних джерел енергії та використання передових систем управління енергією. Особливу увагу приділено виявленню переваг та недоліків кожної з розглянутих технологій, а також аналізу їхньої потенційної ефективності та можливостей застосування на різних типах суден.

Виклад основного матеріалу

Оптимізація суднових електроенергетичних систем може бути досягнута за допомогою різноманітних

шляхів, які можна умовно поділити на кілька категорій.

До *технологічних досягнень* належить впровадження більш ефективних компонентів та систем. Прикладами є високоефективне світлодіодне освітлення та електродвигуни, приводи зі змінною частотою (VFD) для контролю швидкості, енергоефективні трансформатори та інтеграція передових акумуляторних технологій.

Експлуатаційні стратегії зосереджуються на оптимізації способу експлуатації та управління існуючими системами. Вони охоплюють такі практики, як ефективна зарядка та управління акумуляторами, відповідальне споживання енергії, інструменти для контролю пікових навантажень та оптимізація швидкості судна на основі міркувань енергоефективності.

Інтеграція альтернативних джерел енергії передбачає включення відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна енергія та вітрова енергія, до енергетичного балансу судна. Ця стратегія акцентує особливу увагу на розвитку та впровадженні рішень із накопичення енергії, що забезпечує резервування цих переривчастих джерел.

Системна оптимізація охоплює підходи, які розглядають всю суднову енергетичну систему цілісно. До цієї категорії належать гібридні пропульсивні установки, оскільки вони передбачають інтеграцію кількох джерел енергії. Системи утилізації відпрацьованого тепла також є прикладом системної оптимізації шляхом використання вторинної енергії. Передові системи управління енергією (EMS) мають вирішальне значення для координації та оптимізації роботи цих складних систем.

Стратегії цифровізації будуються на основі автоматизованих систем моніторингу та керування САЕЕС, використанні моделей штучного інтелекту (ШІ) для аналізу даних в реальному часі, прийнятті рішень для оптимального налаштування та прогнозування майбутнього стану системи для можливості адаптивної конфігурації.

Багаторівневий підхід до оптимізації, що охоплює окремі компоненти, експлуатацію, альтернативні джерела енергії та інтелектуальні системи керування, є ключем до збільшення рівня ефективності систем. Оптимізація лише окремого компонента може дати обмежені результати без урахування загальної роботи системи та потенціалу інтеграції альтернативних джерел.

Огляд сучасних технологій, спрямованих на підвищення ефективності САЕЕС.

Системи берегового живлення суден (STS) дозволяють суднам підключатися до берегової електричної мережі під час стоянки в порту, що дає змогу вимкнути їхні допоміжні дизель-генератори та підзарядити акумулятори (рис. 1). Основна мета цієї технології полягає у ліквідації місцевих шкідливих викидів. Важливим питанням є забезпечення сумісності між електричною системою судна та береговим живленням відносно напруги та частоти струму. І хоча процес глобальної

стандартизації по цим параметрам розвивається, але різноманіття конфігурацій на різних судах ще велике. Тому для рішення цієї проблеми ведуться активні роботи зі сторони берегової частини STS, додаючи опції автоматичної адаптації параметрів берегової мережі до параметрів обладнання на судні [5].

Переваги. Використання STS може призвести до зниження витрат, оскільки берегова електроенергія

часто дешевша за енергію, вироблену на борту судна. З вимкненими генераторами судна полегшується виконання ремонтних робіт. Система може забезпечити двостороннє перетворення енергії, що дозволяє передавати енергію з берега на судно і навпаки. І основна перевага це зменшення забруднення навколишнього середовища та шуму в портових зонах.

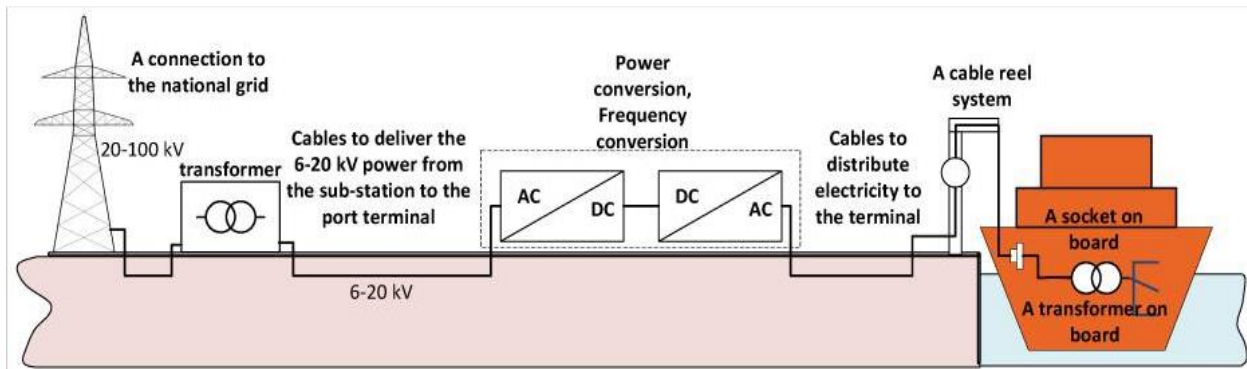


Рис. 1 – Схема роботи системи берегового живлення судна

Недоліки та обмеження. Впровадження необхідної інфраструктури в портах та модернізація суден несуть у собі значні фінансові витрати. Також складності додають технічні проблеми із забезпеченням узгодження напруги та частоти струму. STS застосовується переважно під час стоянки суден, а не під час навігації. У випадку, якщо берегова мережа значною мірою залежить від викопного палива, загальне скорочення негативного впливу на навколишнє середовище може бути менш значним.

Приклади застосування. STS часто використовуються контейнеровозами та пасажирськими суднами. Законодавство ЄС вимагає використання цієї технології для цих типів суден у портах ЄС з 2030 року [5]. Окрім цього, серед користувачів STS часто зустрічаються газовози СПГ, танкери, пороми та мега-яхти. STS також часто використовується на електричних та гібридних судах для заряджання акумуляторів.

Зростаючий регуляторний тиск та збільшення кількості портів, що впроваджують інфраструктуру STS, свідчать про чітку тенденцію до її розширення. Однак технічні та економічні проблеми потребують їх вирішення шляхом стандартизації та впровадження технологічних досягнень для забезпечення глобального безперебійного та ефективного використання STS.

Підвищення енергоефективності за допомогою передових технологій.

Високоєфективне освітлення та електродвигуни. Заміна традиційних ламп розжарювання та люмінесцентних ламп на світлодіодне освітлення забезпечує значну економію енергії та набагато рідше потребує заміни. Енергоефективні електродвигуни зменшують втрати енергії (втрати в залізі, втрати в статорі та роторі, втрати на тертя) та вимагають менших витрат на

обслуговування. Електронні плавні пускачі забезпечують плавне прискорення та гальмування двигунів, зменшуючи пошкодження обмоток та підшипників, тим самим збільшуючи термін служби двигуна. Системи рекуперації ковзної потужності покращують контроль швидкості асинхронних двигунів з фазним ротором, збираючи надлишкову потужність ковзання та передаючи її на вал двигуна як механічну чи електричну енергію [5].

Приводи змінної частоти (VFD) використовуються для контролю швидкості та крутного моменту електродвигунів змінного або постійного струму шляхом регулювання напруги та вхідної частоти. Переваги включають миттєвий запуск без затримки нагріву, контрольований та плавний пуск, точне керування процесами та мінімізацію механічного зносу. VFD застосовуються в різних бортових системах, таких як насоси охолодження морської води, живильні насоси котлів, насоси HVAC, водовідливні насоси, вентилятори машинного відділення та рефрижераторні контейнери. Ця технологія пропонує значний потенціал енергозбереження, із зниженням витрат до 60% [6-8].

Енергоефективні трансформатори, в конфігурації з аморфним осердям, можуть зменшити втрати енергії приблизно на 70% порівняно зі звичайними трансформаторами. Вони також підтримують високу ефективність при низьких навантаженнях. Електронні пускорегулювальні пристроїв, що використовуються разом з люмінесцентними лампами, контролюють пускову напругу та робочий струм, підвищуючи ефективність за рахунок усунення мерехтіння та зменшення споживання енергії до 40% за рахунок роботи на вищій частоті (40-50 кГц замість 60 Гц) [6].

Системи утилізації відпрацьованого тепла вловлюють теплову енергію з вихлопних газів та охолоджуючої води, підвищуючи загальну ефективність системи та зменшуючи споживання палива. Рекупероване тепло може використовуватися для різних бортових потреб, таких як підігрів бункерного палива, опалення приміщень судна, виробництво прісної води та навіть генерації електроенергії. Найпоширенішим пристроєм є утилізаційний котел (EGB), який виробляє пару, пропускаючи вихлопні гази через теплообмінник. За допомогою термоелектричних генераторів теплова енергія перетворюється в електричну. Гібридні турбокомпресори використовують енергію вихлопних газів для обертання компресора, а також виробляють електроенергію через вбудований генератор [6].

Різноманітність технологій та застосувань для утилізації відпрацьованого тепла демонструє її значний потенціал для підвищення енергоефективності в морській галузі.

Передові системи управління енергією (EMS) забезпечують інтелектуальний контроль потоку енергії в складних судових електроенергетичних системах, особливо в тих, що мають кілька джерел енергії. Ці системи оптимізують виробництво, розподіл та споживання енергії на основі даних у реальному часі та експлуатаційних вимог, маючи на меті мінімізацію споживання палива, зменшення викидів та підвищення надійності системи. EMS є важливими для управління складними взаємодіями між різними джерелами енергії на гібридних судах, забезпечуючи найефективніше використання кожного компонента. Вони відіграють ключову роль в оптимізації інтеграції переривчастих відновлюваних джерел енергії з системами зберігання енергії, забезпечуючи стабільне та надійне енергопостачання.

Сучасні EMS використовують аналітику даних, можливість прогнозування та передові алгоритми оптимізації, переходячи від простих систем на основі правил до більш динамічних та контекстно-залежних стратегій управління енергією, які можуть адаптуватися до мінливих умов та оптимізувати продуктивність у реальному часі [2, 9].

Інтеграція відновлюваних джерел енергії. Сонячна енергія набуває популярності, як ефективне, екологічно чисте, безшумне та безвикидне джерело енергії. Її можна використовувати для різних цілей: живлення бортових систем, заряджання акумуляторів і навіть для сприяння пропульсії в деяких випадках. В світі вже є поромі та вантажні судна, де основною генерацією енергії є сонячна. Також з розвитком технологій збільшується значення морських сонячних електростанцій. Майбутні напрямки розвитку включають розробку надлегких панелей та самоочисного покриття для підвищення практичності в морських умовах.

Основні проблеми представлені переривчастим характером сонячної генерації, обмеженістю простору на судах та початковими інвестиційними витратами на панелі та системи інтеграції.

Досліджуються різні технології *віetroвої* допомоги пропульсії, включаючи роторні вітрила (які використовуються Anemoi Marine для суден Berge Bulk), жорсткі крилові системи (такі як WindWings від BAR Technologies) та навіть невеликі вітрогенератори для вітрильників. Ці технології забезпечують значну економію палива та скорочення викидів. Вітрова пропульсія може знизити шкідливі викиди на певних маршрутах на 28%. Тому модернізація існуючих суден за допомогою технологій віetroвої допомоги є складним, специфічним але перспективним напрямком. Ключові фактори включають наявність вітру на маршруті судна та інтеграцію цих систем з існуючими пропульсивними та енергетичними системами [6].

Активна розробка та зростаюче впровадження як сонячної, так і віetroвої енергії в морській галузі свідчать про потужний рух до декарбонізації та зменшення залежності від традиційних викопних видів палива. Процес подолання обмежень, таких як вага панелей, ефективність у морських умовах та проблеми з наявністю вітру та сонця в конкретний час, спрямований на те, щоб зробити рішення з відновлюваних джерел енергії більш практичними та ефективними для широкого впровадження в судноплавстві.

Водень став перспективним альтернативним паливом для морського транспорту завдяки своєму потенціалу нульових викидів при виробництві з відновлюваних джерел. Існує два основних типи судових енергетичних систем, що використовують водень як паливо: системи які використовують водневі паливні елементи та водневі двигуни внутрішнього згорання.

Водневі паливні елементи перетворюють хімічну енергію водню та кисню в електричну енергію, а єдиними побічними продуктами є вода та тепло.

Водневі двигуни внутрішнього згорання (HICE) спалюють водень у камері згорання для виробництва енергії, подібно до традиційних двигунів внутрішнього згорання.

Водневі паливні елементи, мають вищу енергетичну ефективність, ніж традиційні двигуни внутрішнього згорання, особливо при низьких навантаженнях. Ефективність паливних елементів може сягати 65%, порівняно з 33-35% для традиційних електростанцій на основі згорання.

До основних недоліків використання водню відносяться проблеми зберігання, транспортування та необхідність додаткової портової інфраструктури. Водень має низьку об'ємну енергоємність порівняно з традиційними видами палива, що вимагає значно більших паливних баків для досягнення порівнянних запасів ходу. Транспортування водню у великих обсягах, необхідних для судноплавства, може бути складним і дорогим як у вигляді стиснутого газу, так і в рідкому стані. Рідкий водень вимагає криогенних температур, що збільшує енергетичні та вартісні витрати на транспортування. До того ж водень є легкозаймистим газом з широким діапазоном займистості (4-75% в повітрі) та низькою енергією займання. Це вимагає суворих

заходів безпеки та спеціалізованого обладнання для запобігання витокам та мінімізації ризиків [7, 10].

Розвиток мережі водневих заправних станцій у портах є вирішальним фактором для широкого впровадження суден, що працюють на водні, і це вимагає значних інвестицій та розвитку інфраструктури.

Гібридні пропульсивні системи поєднують традиційні двигуни внутрішнього згоряння з електродвигунами та системами зберігання енергії для оптимізації роботи двигуна та зменшення викидів. Відомі сучасні конфігурації складаються з дизель-електричних систем, де дизельні генератори виробляють енергію для живлення електродвигунів, які вже забезпечують пропульсію, та акумуляторних систем, які використовують збережену енергію для доповнення або заміни потужності основного генератора в певних режимах роботи. Гібридні системи зазвичай керуються системами EMS та пропонують різноманітні режими роботи, такі як резерв оборотної (реверсивної) потужності (reversible power, використання акумулятора замість додаткового генератора), зелений режим (робота з нульовими викидами з використанням лише акумуляторної енергії) та режим старт-стоп (використання акумуляторної енергії при низьких неоптимальних навантаженнях двигуна) [4, 6, 11].

Забезпечуючи роботу двигунів в оптимальних режимах, гібридні системи значно підвищують ефективність використання палива. Використання акумуляторної енергії для пропульсії або неоптимальних навантажень призводить до зменшення викидів, особливо в режимах з нульовими викидами в портових зонах або

екологічно чутливих районах. Електродвигуни забезпечують миттєвий крутний момент та точне керування, покращуючи маневреність суден, особливо у вузьких місцях або під час операцій динамічного позиціонування. Гібридні системи збільшують гнучкість в управлінні енергією та резервування у випадку відмови двигуна або мотора.

Гібридна пропульсія впроваджується на широкому спектрі типів суден, включаючи пороми (Finnlines, Brittany Ferries), танкери, буксири (Maersk Minder, Rawabi 324), балкери (Aasen Shipping, Misje Vita), круїзні судна, яхти та інші. У декількох випадках було зафіксовано значну економію палива, наприклад, до 40% для гібридного балкера Misje Vita. Модернізація існуючих суден гібридними системами також стає все більш поширеною, про що свідчать гібридні оновлення Wärtsilä HY для Harvey Gulf International Marine та Maersk Minder.

Здатність гібридних систем працювати в різних режимах забезпечує індивідуальний підхід до енергоефективності та зменшення викидів залежно від конкретних умов роботи судна.

Порівняльний аналіз сучасних технологій.

Як показано у таблиці 1, економічні переваги та компроміси між напрямками підвищення ефективності цілком очевидні. Наприклад, технології з високим потенціалом економії палива та зменшення викидів часто мають вищі початкові інвестиційні витрати. Вибір конкретних технологій або їх поєднання має бути адаптований до конкретних характеристик та експлуатаційних потреб різних типів суден.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз сучасних технологій на основі ключових параметрів: економія палива, зменшення викидів, надійність та вартість впровадження

Технологія	Економія палива	Зменшення викидів	Надійність	Вартість
Берегове живлення суден (STS)	висока (в порту)	значне (в порту)	залежить від інфраструктури	висока
LED освітлення, електродвигуни	низька/середня	низьке/середнє	підвищена	низька/середня
Приводи змінної частоти (VFD)	середнє/висока	середнє/високе	підвищена	середня
Гібридна пропульсія	середнє/високе	середнє/висока	підвищена резервування	висока
Водень	середнє/високе	високе	середня	висока
Відновлювана енергія (сонячна та вітрова)	низька до високої (залежно від застосування та умов)	значне (залежить від погоди та конструкції системи)	підвищена	середня/висока
Передові системи управління енергією (EMS)	середня до високої (забезпечує роботу інших напрямів)	середнє/висока (забезпечує роботу інших напрямів)	підвищена (за рахунок кращого контролю)	середня/висока
Системи утилізації відпрацьованого тепла	середня	середнє	підвищена	середня/висока

Круїзні судна. Високе енергоспоживання, часті заходи в порти роблять STS, гібридну пропульсію, утилізацію відпрацьованого тепла та енергоефективні системи (освітлення, HVAC) дуже актуальними.

Контейнеровози. Довгі рейси в морі роблять доцільними повільне плавання (експлуатаційне), оптимізацію корпусу, утилізацію відпрацьованого тепла та потенційно вітрову пропульсію. STS є важливою ланкою енергосистеми під час стоянок у портах.

Пороми. Часті заходи в порти та потенційно коротші маршрути роблять гібридну або навіть повністю електричну пропульсію із заряджанням від берега (STS) ефективним варіантом.

Буксири. Високі коливання навантаження та періоди очікування роблять вигідними гібридні або повністю електричні рішення.

Військові судна. Сценарії використання військових суден спрямовані на максимізацію надійності, автономності та швидкості усунення пошкоджень, навіть шляхом збільшення витрат чи шкідливих викидів. Важливість швидкості маневрування також виходять на перший план у деяких сценаріях. Тому використання гібридних систем, резервних джерел живлення та інтелектуального керування (EMS) є вдалим рішенням.

Порівняльний аналіз показує, що не існує єдиного універсального варіанту. Ідеальний підхід передбачає комбінацію стратегій, адаптованих до конкретного типу судна, його експлуатаційного профілю та пріоритетів власника щодо витрат, викидів та надійності.

Тенденції та напрямки розвитку САЕЕС.

Штучний інтелект являє собою швидкозростаючу технологію, яка знаходить застосування практично в усіх сферах нашого життя. Здатність ШІ аналізувати великі обсяги даних, виявляти закономірності та приймати інтелектуальні рішення відкриває значні перспективи для покращення роботи САЕЕС. Використання алгоритмів машинного навчання, нейронних мереж та експертних систем може призвести до підвищення надійності, зниження експлуатаційних витрат та покращення енергоефективності в морській галузі. Вже зараз ШІ знаходить конкретне застосування для оптимізації різних аспектів роботи суднових електричних систем [12].

Покращена навігація. Компанія Orca AI вже інтегрує моделі штучного інтелекту у навігаційні системи.

Ці рішення використовують комп'ютерний зір та різноманітні датчики для надання екіпажам суден у режимі реального часу уявлення про їхнє оточення. Це значно полегшує задачу персоналу, особливо в умовах поганої видимості або в водах з щільним трафіком. До того ж системи можуть автономно відслідковувати інші судна чи об'єкти і попереджати про ризики зіткнення.

Прогнозування відмов обладнання. Алгоритми машинного навчання використовуються для аналізу даних датчиків (температури, вібрації, електричного розряду) в реальному часі з метою прогнозування відмов генераторів, двигунів, акумуляторів та іншого

обладнання. Також ці технології допомагають передбачити, коли конкретні деталі потребуватимуть обслуговування. Цифрові двійники дозволяють моделювати весь шлях експлуатації судна та прогнозувати знос обладнання [13, 14].

Оптимізація енергоспоживання. ШІ-системи використовуються для оптимізації маршрутів суден з урахуванням погодних умов, течій та характеристик судна для мінімізації споживання палива. Наприклад, компанія Maersk використовує інструмент ШІ для оптимізації маршрутів судноплавства та швидкості суден, мінімізуючи споживання палива та викиди. Системи ШІ також застосовуються для динамічного управління енергією та оптимізації розподілу енергії на борту. Рішення ABB Ability™ OptimE використовує накопичені дані для вивчення залежності між швидкістю судна та кутом повороту гвинта з метою оптимізації ефективності рушійної установки, зменшення споживання енергії та мінімізації викидів [12].

Керування навантаженням. Алгоритми ШІ використовуються для оптимального планування завантаження та розміщення вантажу на суднах з метою максимізації використання простору та забезпечення стійкості, що опосередковано впливає на електричне навантаження. Програмне забезпечення NanoPredict AI може балансувати різні джерела живлення для оптимізації використання зеленої енергії та зменшення залежності від генераторів під час низьких навантажень [12].

Інтеграція альтернативних видів палива та їх вплив на електричні системи. Перехід на альтернативні види палива, такі як водень, кардинально вплине на екологічну ефективність САЕЕС. Водень є багатообіцяючим паливом для декарбонізації морського сектору завдяки його потенціалу нульових викидів при виробництві з відновлюваних джерел. Водневі паливні елементи пропонують високу ефективність, безшумну роботу та відсутність викидів (крім води), тоді як водневі двигуни внутрішнього згорання забезпечують потенційну сумісність з існуючими технологіями.

Розвиток потужніших та ефективніших технологій зберігання енергії. Використання в акумуляторних технологіях нових хімічних складів, таких як літій-залізо-фосфатні (LFP) та літій-титанатні (LTO), пропонують переваги щодо терміну служби, маси та вартості.

Перспективи розвитку оптимізації суднових енергетичних систем нерозривно пов'язані з ширшими тенденціями цифровізації, автоматизації та переходу до чистіших видів палива. Розвиток цієї сфери стимулюватимуть розробку та впровадження більш складних та інтегрованих рішень.

Технології зберігання енергії відіграватимуть дедалі важливішу роль у забезпеченні впровадження як відновлюваних джерел енергії, так і гібридних пропульсивних установок, виступаючи ключовим фактором для чистішого та ефективнішого судноплавства.

Перспективи подальших досліджень. Дослідження в цій галузі можуть бути продовжені в декількох перспективних напрямках.

По-перше це питання синтезу сучасних САЕЕС та систем штучного інтелекту, побудова моделі, мережі датчиків та основних алгоритмів взаємодії.

По-друге, це створення цифрових двійників та емуляторів таких систем, їх оптимізація та аналіз потенційної ефективності в розрізі ключових параметрів.

По-третє, це оцінка ризиків збільшення відсотку автоматизації на судні, побудова процесу кібербезпеки та опрацювання аварійних режимів.

Також дуже важливо приділити увагу моральним та правовим питанням ролі штучного інтелекту в галузі та допустимого рівня його автономності.

Висновки

Проведений аналіз сучасних шляхів оптимізації роботи суднових електроенергетичних систем виявив широкий спектр технологій та стратегій, спрямованих на підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу морського транспорту. Берегове живлення суден є ефективним рішенням для значного скорочення викидів та шуму в портових зонах, дозволяючи суднам використовувати більш чисту берегову електроенергію замість суднових дизель-генераторів. Однак його широке впровадження залежить від розвитку портової інфраструктури та стандартизації.

Технологічні досягнення, такі як високоефективне світлодіодне освітлення та електродвигуни, а особливо електричні приводи змінної частоти (VFD), пропонують значний потенціал для зниження енергоспоживання в бортових системах, забезпечуючи економію енергії до 60% у деяких застосуваннях. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, хоча і стикається з проблемами переривчастості та обмеженості простору, демонструє зростаючу перспективність у зменшенні залежності від вичерпного палива.

Гібридні пропульсивні системи забезпечують значну економію палива, зменшення викидів та покращену маневреність, що підтверджується численними прикладами їх успішного впровадження на різних типах суден. Системи утилізації відпрацьованого тепла, такі як котли-утилізатори та системи органічного циклу Ренкіна, дозволяють ефективно використовувати теплову енергію, яка інакше була б втрачена, підвищуючи загальну ефективність судна.

Ключову роль у координації та оптимізації роботи всіх цих складових енергосистем судна відіграють передові системи управління енергією (EMS), які на основі даних у реальному часі та інтелектуальних алгоритмів забезпечують мінімізацію споживання палива та викидів. Сучасні акумулятори є важливим елементом багатьох сучасних рішень з оптимізації, забезпечуючи ефективне зберігання енергії для гібридних

систем, роботи з нульовими викидами та управління піковими навантаженнями.

Перехід до альтернативних видів палива (водень) та альтернативних джерел енергії (сонячна та вітрова генерація) вимагатиме інтеграції нових технологій в електричні системи суден та додаткових витрат. Але погіршення екологічної ситуації не залишає вибору, окрім продовження досліджень в цій галузі.

Порівняльний аналіз показав, що вибір оптимального поєднання технологій залежить від конкретного типу судна, його умов експлуатації та пріоритетів судновласника. Майбутні тенденції в галузі оптимізації суднових енергетичних систем тісно пов'язані з цифровізацією та автоматизацією, що дозволить досягти більш точного управління та прогнозування енергоспоживання.

Також особливу увагу потрібно звернути на зростаючий потенціал штучного інтелекту для оптимізації роботи САЕЕС. Впровадження ШІ дозволить підвищити надійність обладнання, знизити експлуатаційні витрати, покращити енергоефективність та підвищити рівень безпеки судноплавства. Незважаючи на існуючі виклики та обмеження, такі як необхідність у великих обсягах якісних даних, забезпечення кібербезпеки та надійності систем в суворих морських умовах, активні дослідження та розробки в цій галузі свідчать про значний прогрес.

Таким чином, майбутнє ефективних суднових електроенергетичних систем полягає в інтегрованому застосуванні ряду сучасних технологій та стратегій, адаптованих до конкретних потреб кожного судна. Постійні дослідження та інновації в цій галузі є критично важливими для досягнення екологічної безпеки та економічної ефективності морського транспорту.

Перелік використаних джерел

- [1] Hüffmeier J., Johanson M. State-of-the-Art Methods to Improve Energy Efficiency of Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(4). Article 447. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9040447>.
- [2] Mylonopoulos F., Polinder H., Coraddu A. A Comprehensive Review of Modeling and Optimization Methods for Ship Energy Systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. Pp. 32697–32707. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3263719>.
- [3] Optimization-Based Power and Energy Management System in Shipboard Microgrid: A Review / P. Xie et al. *IEEE Systems Journal*. 2022. Vol. 16(1). Pp. 578–590. DOI: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3047673>.
- [4] Hong S. H., Kim D. M., Kim S. J. Power Control Strategy Optimization to Improve Energy Efficiency of the Hybrid Electric Propulsion Ship. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 22534–22545. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3364374>.
- [5] German-Galkin S., Tarnapowicz D. Energy Optimization of the ‘Shore to Ship’ System - A Universal Power

- System for Ships at Berth in a Port. *Sensors*. 2020. Vol. 20(14). Article 3815. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20143815>.
- [6] Animah I., Adjei P., Djamesi E.K. Techno-economic feasibility assessment model for integrating hybrid renewable energy systems into power systems of existing ships: A case study of a patrol boat. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2022. Vol. 22(1). Pp. 22–37. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2087272>.
- [7] Enhancing renewable energy utilization and energy management strategies for new energy yachts / Z. Wang et al. *Heliyon*. 2024. Vol. 10(18). Article e37863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37863>.
- [8] İnal Ö.B., Koçak G. A Case Study on the Variable Frequency Drive for Ship Engine Room Ventilation. *Marine Science and Technology Bulletin*. 2023. Vol. 12(3). Pp. 252-258. DOI: <https://doi.org/10.33714/masteb.1299692>.
- [9] Scenario- and Optimization-Based Control of Marine Electric Power Systems. URL: <https://torarnj.folk.ntnu.no/tib.pdf> (дата звернення: 26.03.2025).
- [10] Challenges in the use of hydrogen for maritime applications / L. Van Hoecke. *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 14(2). Pp. 815-843. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0ee01545h>.
- [11] Seven fascinating hybrid ship trends that everyone needs to know about. URL: <https://www.wartsila.com/insights/article/seven-fascinating-hybrid-ship-trends-that-everyone-needs-to-know-about> (дата звернення: 26.03.2025)
- [12] Ways AI is Quietly Taking Over the Shipping Industry. URL: <https://www.shipuniverse.com/15-ways-ai-is-quietly-taking-over-the-shipping-industry/> (дата звернення: 26.03.2025)
- [13] Riyadh M. Transforming the Shipping Industry with Autonomous Ships and Artificial Intelligence. *Maritime Park Journal of Maritime Technology and Society*. 2024. Vol. 3(2). Pp. 80-85. DOI: <https://doi.org/10.62012/mp.v3i2.35386>.
- [14] Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications / Durluk I., Miller T., Kostecka E., Tuński T. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(18). Article 8420. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14188420>.

ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION OF MODERN TECHNOLOGIES TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SHIP ELECTRIC POWER SYSTEMS

Polyvoda V.V.

PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7742-255X>, e-mail: polyvodavv@gmail.com;

Samoilov S.

postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4454-0510>, e-mail: samoilovserhii.ksma@gmail.com

The work focused on research of current technologies for optimizing shipboard electrical power systems. It examined the challenges and factors driving progress in this field, such as the negative impact of the maritime industry on the environment and the constant growth of competition. Examples of the most effective technological advances are provided, including LED-based lighting systems, energy-efficient electric motors, variable frequency drives, and hybrid power sources. The strategies aimed at promoting rational and conscious energy consumption, with the effective management of energy storage systems are analysed. Significant attention is dedicated to the integration of alternative energy sources, such as solar and wind power and their potential to contribute to the decarbonization of shipping and reduce dependence on traditional fuels. Hybrid propulsion systems, waste heat recovery systems and advanced energy management are explored as comprehensive and integrated approaches to optimizing energy consumption on vessels. The rapid development of energy storage solutions, such as lithium-ion batteries, is noted, which are very important in ensuring the efficient and reliable operation of hybrid and fully electric ships. The article provides a comparative analysis of the considered optimization approaches based on key criteria, such as fuel economy, emission reduction level, overall reliability and economic feasibility of implementation. In addition, the article illustrates the successful application of these optimization strategies on different types of ships, ranging from small ferries to large container ships and cruise liners. A separate section presents an overview of the latest scientific research and publications in this field and future trends and development directions in ship power system optimization including the growing role of digitalization, automation, the use of artificial intelligence, the adoption of alternative fuels.

Keywords: ship power systems, energy efficiency, environmental impact, optimization, digitalization, alternative fuels, maritime transport, electric vessels.

References

- [1] J. Hüffmeier, and M. Johanson, "State-of-the-Art Methods to Improve Energy Efficiency of Ships," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9(4), 447, 2021. doi: [10.3390/jmse9040447](https://doi.org/10.3390/jmse9040447).
- [2] F. Mylonopoulos, H. Polinder, and A. Coraddu, "A Comprehensive Review of Modeling and Optimization Methods for Ship Energy Systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 32697-32707, 2023. doi: [10.1109/access.2023.3263719](https://doi.org/10.1109/access.2023.3263719).
- [3] P. Xie et al, "Optimization-Based Power and Energy Management System in Shipboard Microgrid: A Review," *IEEE Systems Journal*, vol. 16(1), pp. 578-590, 2022. doi: [10.1109/jsyst.2020.3047673](https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3047673).
- [4] S.H. Hong, D.M. Kim, and S.J. Kim, "Power Control Strategy Optimization to Improve Energy Efficiency of the Hybrid Electric Propulsion Ship," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 22534-22545, 2024. doi: [10.1109/access.2024.3364374](https://doi.org/10.1109/access.2024.3364374).
- [5] S. German-Galkin, and D. Tarnapowicz, "Energy Optimization of the 'Shore to Ship' System - A Universal Power System for Ships at Berth in a Port," *Sensors*, vol. 20(14), article 3815, 2020. doi: [10.3390/s20143815](https://doi.org/10.3390/s20143815).
- [6] I. Animah, P. Adjei, and E. K. Djamesi, "Techno-economic feasibility assessment model for integrating hybrid renewable energy systems into power systems of existing ships: A case study of a patrol boat," *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 22(1), pp. 22-37, 2022. doi: [10.1080/20464177.2022.2087272](https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2087272).
- [7] Z. Wang, M. Li, N. Cao, P. Liao, Y. Ji, and F. Han, "Enhancing renewable energy utilization and energy management strategies for new energy yachts," *Heliyon*, vol. 10(18), article e37863, 2024. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e37863](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37863).
- [8] Ö.B. İnal, and G. Koçak, "A Case Study on the Variable Frequency Drive for Ship Engine Room Ventilation," *Marine Science and Technology Bulletin*, vol. 12(3), pp. 252-258, 2023. doi: [10.33714/masteb.1299692](https://doi.org/10.33714/masteb.1299692).
- [9] Scenario- and Optimization-Based Control of Marine Electric Power Systems. [Online]. Available: <https://toramj.folk.ntnu.no/tib.pdf>. Accessed on: March 26, 2025.
- [10] L. Van Hoecke, L. Laffineur, R. Campe, P. Perreault, S.W. Verbruggen, and S. Lenaerts, "Challenges in the use of hydrogen for maritime applications," *Energy & Environmental Science*, vol. 14(2), pp. 815-843, 2021. doi: [10.1039/d0ee01545h](https://doi.org/10.1039/d0ee01545h).
- [11] Seven fascinating hybrid ship trends that everyone needs to know about. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/insights/article/seven-fascinating-hybrid-ship-trends-that-everyone-needs-to-know-about>. Accessed on: March 26, 2025.
- [12] 15 Ways AI is Quietly Taking Over the Shipping Industry. [Online]. Available: <https://www.shipuniverse.com/15-ways-ai-is-quietly-taking-over-the-shipping-industry/>. Accessed on: March 26, 2025.
- [13] M. Riyadh, "Transforming the Shipping Industry with Autonomous Ships and Artificial Intelligence," *Maritime Park Journal of Maritime Technology and Society*, vol. 3(2), pp. 80-85, 2024. doi: [10.62012/mp.v3i2.35386](https://doi.org/10.62012/mp.v3i2.35386).
- [14] I. Durluk, T. Miller, E. Kostecka, and T. Tuński, "Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications," *Applied Sciences*, vol. 14(18), 8420, 2024. doi: [10.3390/app14188420](https://doi.org/10.3390/app14188420).

Стаття надійшла 24.04.2025

Стаття прийнята 05.06.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Поливода В. В., Самойлов С. О. Аналіз впровадження сучасних технологій для підвищення ефективності суднових електроенергетичних систем. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 188-196. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344905>.

**AUTOMATION TECHNOLOGIES IN SHIP SYSTEMS MAINTENANCE:
PROBLEMS AND WAYS TO IMPROVE THROUGH CROSS-SECTOR EXPERIENCE**

Samoilov O.O. postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6711-4769>, e-mail: oleksii.samoilov.ksma@gmail.com;
Simanenkov A.L. PhD (Engineering), senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0797-5276>, e-mail: simanenkov.andrii@gmail.com

The cross-sector borrowing of advanced automation technologies from the aviation, railway, automotive, energy, aerospace, and logistics sectors is considered to improve the reliability, safety, and efficiency of maritime transport maintenance. This study emphasizes the importance of transitioning from traditional scheduled maintenance to approaches based on actual technical condition and failure prediction. Based on a review of successful solutions in other industries, the article analyzes the possibilities of adapting the following innovations in the maritime industry: the introduction of equipment remote monitoring, digital twins, internet of things (IoT) sensors, diagnostic systems and machine learning for technical condition analysis, the use of drones and autonomous robots for inspection and emergency work, as well as the development of comprehensive digital maintenance management platforms. The article demonstrates that such technologies have already proven their efficiency in related sectors - reducing the number of accidents by 30–70%, reducing repair costs by up to 40%, and reducing downtime by 20–50%. At the same time, the maritime industry implements these approaches slowly, due to the lack of open databases for training forecasting models and the absence of unified standards for exchanging technical information. The paper emphasizes the need for a systematic approach to integrating predictive maintenance into water transport, creating a regulatory framework, developing a digital fleet infrastructure, and training personnel to work with new monitoring and analysis tools. The paper provides examples of already implemented initiatives, including remote monitoring of ships' engines, the use of certified drones for tank inspections, and analytical platforms for fleet maintenance management. It also describes potential future developments, such as repairing drones, autonomous firefighting modules, and digital ship health passports. The study's results indicate that implementing predictive maintenance can become a key direction in the digital transformation of the maritime industry. This will not only increase the reliability of vessels and the safety of crews but also significantly reduce operating costs, minimize environmental risks, and ensure a higher level of fleet readiness for modern challenges.

Keywords: maritime industry, automation, cross-industry expertise, predictive maintenance, condition-based maintenance, remote monitoring, artificial intelligence, reliability.

Statement of the problem

The modern maritime industry is facing challenges of increasing the reliability of ship equipment, improving transportation safety, minimizing accidents, and reducing operating costs. Despite the increasing complexity of marine systems, the pace of innovation in maintenance remains slow compared to other developed industries. High-tech industries, including aviation, railways, road transport, energy, and aerospace, have unique experience in implementing advanced automated monitoring, diagnostics, and predictive maintenance systems to increase reliability and safety [1, 2, 3]. The question arises: what technologies from these industries can maritime affairs borrow, and how will this improve monitoring, diagnostics, ensuring reliability, preventing errors and accidents, fault tolerance, emergency operations, technical inspections, and predictive maintenance in the fleet?

This article reviews the achievements of automation in related industries, presents quantitative results of their implementation based on research data, and analyzes the state of adaptation of these technologies in the maritime industry. The article pays particular attention to developing predictive maintenance, as the maritime industry has historically relied on routine maintenance and manual monitoring of the vessel's equipment, which is ineffective.

The relevance of the topic stems from the need for a rapid transition to digital, fault-tolerant systems that can reduce accidents and costs, while also ensuring a high level of safety at sea [4].

**Analysis of the latest achievements
on the identified problem**

Numerous studies, discussed below, have already demonstrated the effectiveness of predictive maintenance (PdM), the Internet of Things (IoT), Big Data, and digital twins in related industries, including aviation, energy, transport, and logistics [2, 5, 6]. They indicate a significant increase in equipment reliability, a reduction in accidents, and cost optimization due to a combination of monitoring, diagnostics, and forecasting based on big data and artificial intelligence. Collecting large datasets from equipment and analyzing them can lead to a significant increase in reliability. Effects similar to those of aviation and railways, including 30% lower repair costs, 70% fewer accidents, and 40% less downtime, have become typical for enterprises that have switched to automated predictive maintenance in the energy sector [7].

However, in the maritime industry, such technologies are implemented fragmentarily, without unified standards and with significant barriers to adaptation [8]. However,

there are isolated examples of the implementation of computer-based monitoring (CBM) systems and digital platforms (e.g., Wärtsilä, Rolls-Royce Marine) [9]; a comprehensive approach to integrating such solutions has not been established. There are no unified databases for training prediction models, no standardized interfaces for sensors and platforms, and no protocols, such as an automated storage and retrieval system (ASRS), for sharing incidents [5].

Unsolved problems include adaptation of cross-sectoral solutions to marine conditions, integration of autonomous diagnostic and emergency response systems, development of PdM models for key marine nodes, and automation of technical inspection without human intervention (robots, drones).

Purpose and task statement

The purpose of the work is to substantiate the feasibility and provide practical examples of implementing automation technologies from other industries into the maritime sector, thereby enhancing the reliability, safety, and efficiency of technical maintenance. The task is to conduct an interindustry analysis of effective automation solutions, identify mechanisms that can be adapted to marine technology, demonstrate existing examples of the implementation of such solutions in the fleet, and outline the prospects for the development of PdM in maritime transport.

Materials and methods

This study employs a qualitative methodology, grounded in a comprehensive literature review and a cross-sectoral comparative analysis. The research involved a systematic review of automation and predictive maintenance (PdM) practices from technologically advanced sectors, including aviation, railway, energy, and aerospace, drawing from scientific and industry publications.

Key qualitative data on specific technologies and quantitative data on their performance – such as reductions in costs, downtime, and accidents – were extracted and synthesized. A comparative analysis was then conducted, contrasting these findings with the current state of the maritime industry. This process identified opportunities and challenges for technology transfer and was used to substantiate the benefits of implementing predictive maintenance in the maritime sector.

Summary of the main material

Aviation is one of the most advanced industries in implementing automated equipment condition monitoring systems. Modern aircraft are equipped with thousands of sensors that collect engine, life support system, and airframe parameters in real-time. For example, Rolls-Royce has been using remote engine monitoring systems since the 1990s. The TotalCare program covers ~72% of Rolls-Royce aircraft engines and provides continuous data collection on their condition. This data is sent to ground diagnostic centers, where analytics detect deviations from the

norm long before they lead to failure. Aviation was the first to introduce the concept of a continuous health and usage monitoring system (HUMS), which enabled the transition from periodic maintenance to condition-based repair.

The results of using such technologies in aviation are impressive. Aerospace and defense organizations that implemented predictive maintenance reduced maintenance costs by up to 30% and reduced the number of unscheduled repairs by 70%. Thanks to predictive strategies, airlines achieved a 25-30% reduction in fleet maintenance costs, a 70-75% decrease in breakdowns, and a 35-45% reduction in aircraft downtime. This is critical for airlines, as an hour of aircraft downtime can cost between \$10,000 and \$150,000. Diagnostic automation also enhances safety: early detection of problems has reduced the number of in-flight emergencies. According to Airbus, the implementation of predictive analytics systems reduces the number of unexpected failures in aircraft systems by 10-50% (with the most significant effects observed in air conditioning, power supply, and landing gear). Honeywell system Forge for APUs prevents ~35% of auxiliary power unit failures and eliminates up to 80% of flight delays associated with hydraulic failures. Thus, aviation demonstrates that comprehensive monitoring and diagnostics solutions (Big Data, IoT, ML) combined with predictive algorithms can radically increase the reliability of the aircraft fleet and avoid accidents through early intervention [3].

The aviation industry has also excelled in preventing errors and accidents by automating flight control. Autopilots and collision avoidance systems (TCAS) have long proven effective in minimizing the human factor. Thanks to automated control systems, modern commercial aviation has achieved an extraordinary level of safety, with fewer than 0.2 accidents per 100,000 flight hours. Aviation's experience in creating fault-tolerant systems (redundancy of critical components, automatic switching to redundant channels in the event of failures) has become a model for other industries. The high reliability of avionics and engines is achieved through both technical redundancy and continuous condition monitoring with automatic diagnostics [10].

Railway transport is also actively implementing automation to increase the reliability of rolling stock and infrastructure. A key area is the real-time tracking and monitoring of train conditions. In recent years, tens of thousands of sensors (including vibration, axle box temperatures, and geophones) have been installed on main lines, and specialized measuring cars utilize laser and ultrasonic scanning to inspect the track. This allows detecting defects (sags, rail cracks) before they lead to an accident, and planning repairs at a convenient time. Network Rail (UK) estimates that the transition to a world-class predictive and risk-based service can significantly reduce infrastructure maintenance costs, the number of failures, and unplanned downtime. Project OptRail, for example, uses fiber-optic sensors along the track (a technology borrowed from oil extraction) to continuously monitor rail stresses and provide early

detection of the risk of track slippage or warping, improving safety and reducing the need for manual inspections [11].

Diagnostics of the train's condition while in motion are actively used. Sensors on cars and locomotives monitor the temperature of axle boxes, the condition of brakes, and pressure in systems. Data is transmitted to cloud platforms, where artificial intelligence algorithms predict the time until component failure. Predictive maintenance in the railway industry enables locomotives and cars to be repaired precisely when needed, thereby avoiding unnecessary maintenance and preventing sudden breakdowns during journeys. The implementation of predictive maintenance on the railway reduces maintenance costs by 10–40% due to schedule optimization and reduction of emergency repairs. Deutsche Bahn has already achieved 25% cost savings after implementing an AI-based infrastructure condition diagnosis system (KONUX system for monitoring switch points). This was achieved by minimizing downtime and maximizing network performance. In addition to cost savings, predictive maintenance enhances traffic safety: the timely repair of wheelsets or rails significantly reduces the risk of train derailments. As a result, automation enables rail operators to maintain a high level of transportation reliability: modern railways have virtually eliminated head-on collisions and serious accidents with the help of electronic systems and automatic blocking [2].

In the field of trucking, automation primarily aims to ensure traffic safety and prevent accidents, while also enhancing the reliability of fleets by monitoring the technical condition of trucks. Modern trucks are equipped with on-board computers and telemetry systems, which constantly collect data on the engine's operation, transmission, brakes, fuel level, and other key components. Fleet management systems (FMS) track the location and condition of each machine in real time and can automatically schedule maintenance when sensors indicate wear (for example, increased vibrations or bearing temperature). According to estimates by the US Department of Energy, implementing predictive maintenance can generally reduce the number of equipment breakdowns (including transportation) by 70% and repair costs by 25%. For auto parks, this means a sharp reduction in truck downtime on the route due to emergency breakdowns and, accordingly, an increase in the punctuality of cargo delivery.

The automotive industry is particularly focused on advanced driver assistance systems (ADAS), which prevent accidents caused by human factors. For example, the industry widely implements automatic emergency braking (AEB) and collision avoidance systems in trucks, and they have already led to a significant reduction in accident rates. The Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) showed that cars with a front sensor and AEB had a 50% reduction in collisions with oncoming traffic (compared to vehicles without such systems). In other words, automatic braking helps to avoid half of potential «truck-on-vehicle» accidents. Lane-keeping systems, blind-spot monitoring, and driver fatigue warning systems also reduce accident risk.

The EU estimates that a complete set of modern ADAS can prevent up to 40% of serious truck accidents.

In parallel, logistics companies are utilizing predictive maintenance for their parking facilities. For example, UPS and DHL delivery services have implemented analysis of truck sensor data, which has allowed them to detect signs of malfunctions (such as a drop in generator voltage or a tire pressure leak) before a breakdown occurs. This has enabled the reduction of sudden failures on the route and lower repair costs. However, specific figures are difficult to provide (due to commercial confidentiality). An additional factor is the reduction of fuel consumption, as monitoring systems optimize driving style and technical condition (for example, the timely replacement of air filters), which provides fuel savings of up to 5–10% [12].

Thus, in trucking, automation is two-faced: on the one hand, it prevents accidents through automatic intervention in control (such as braking and steering), and on the other, it maintains the reliability of equipment through continuous monitoring of the truck's condition and optimizes maintenance based on that condition.

Wind farms, especially offshore ones, operate in difficult-to-reach conditions, so the wind energy industry has actively implemented remote monitoring and diagnostics systems for turbines. Each modern wind turbine is equipped with a set of sensors that measure vibrations on the gearbox and bearings, generator temperature, oil pressure, and other parameters. Specialized software, supervisory control and data acquisition (SCADA), and machine learning algorithms send data from thousands of turbines to control centers, where they analyze trends and detect early signs of damage – for example, an increase in vibrations at a particular frequency can signal the onset of a crack in a gear tooth in the gearbox. Thanks to this, operators can plan a repair window in advance and replace a part before it fails, preventing the turbine from stopping. Practice has shown that a predictive maintenance system can reduce unproductive downtime of wind turbines by 20–30%, thereby increasing annual electricity production (availability) by several percent. Experts estimate that maintenance savings of up to 10% per year can be achieved through better planning and avoidance of emergency repairs. This is borne out in practice: for example, a 126 MW Italian wind farm reported significant reductions in operating costs and increased turbine availability after implementing fully digital control [6].

In addition to purely technical reliability, automation in wind power has allowed for the optimization of turbine efficiency. Continuous monitoring and real-time analysis of weather conditions and loads enable operators to immediately adjust the angles of inclination of the blades and the nacelle's orientation, thereby maximizing generation. Automatic control systems, such as SCADA controllers, perform these adjustments according to the specified algorithms themselves. As a result, large wind farms are now actually controlled automatically, and people only monitor the overall indicators.

Another technology in the wind energy arsenal is the use of drones for condition inspections. Previously, inspecting turbine blades (for cracks or icing) required stopping the turbine and lifting a person to a height of 100 m. Now, autonomous drones equipped with cameras fly around the blades, capturing high-resolution images, and computer vision programs identify even the smallest cracks. Thus, the automation of monitoring and predictive maintenance has become the standard in wind energy, enabling the economic maintenance of hundreds of turbines scattered at sea. Predictive maintenance has transformed wind farm maintenance from responding to breakdowns to planning in advance, minimizing emergency shutdowns and the associated losses [7].

Nuclear power is an industry with uncompromising requirements for reliability and safety, which is why very complex control and protection automation systems have been developed here from the very beginning. Each nuclear power plant (NPP) is equipped with thousands of devices that continuously monitor temperature, pressure, neutron fluxes, and other parameters of the reactor and turbines. Any deviations from the norm are automatically recorded, and the system immediately warns operators or initiates protective actions itself, for example, by emergency shutdown of the reactor in the event of overheating or activation of the shutdown control rod mechanism (SCRAM). A key principle of the nuclear industry is defense in depth, which includes prevention, monitoring, and action to mitigate the consequences. For example, to prevent accidents, all critical components at a nuclear power plant are designed with redundancy (triple redundancy of cooling systems and duplicate sensors for each parameter). If a failure does occur, other channels automatically take over the function – this ensures fault tolerance even in the case of single failures [13].

Over 60 years of nuclear power plant operation, global statistics demonstrate the effectiveness of such automated systems: with over 18,500 reactors in operation, only three major accidents have occurred. In other words, the probability of a serious accident at a reactor is extremely small – about 0.016% per year. Automated safety systems that operate before a person can react achieve this. Lessons from past incidents (e.g., Three Mile Island, 1979) have led to the introduction of even more advanced control systems, including computerized consoles and expert diagnostic systems that help operators interpret an avalanche of signals. The industry is also developing intelligent operator support systems – hybrid AI systems that analyze a large amount of information and suggest optimal actions for personnel to stabilize the regime. For example, in the event of an unusual situation (a rare combination of failures), such a system could offer a response scenario generated based on modeling, anticipating the development of the accident [14].

In terms of monitoring and diagnostics, the nuclear industry sets the highest standards. All NPP equipment undergoes regular automated checks, including valve self-diagnostic systems and tests of emergency diesel generators

underload. Continuous monitoring of equipment at NPPs enables the detection of degradation (for example, a slow increase in pump vibrations) and the planning of its replacement during the next scheduled maintenance, without waiting for an emergency to occur. Thus, elements of predictive maintenance have been utilized for a long time. Throughout this period, control systems support the equipment, as NPPs operate continuously for ~1.5 years between stops for fuel reloading. The result is a very high availability factor. The average installed capacity utilization factor (capacity factor) for nuclear power plants in the United States exceeds 92%, which is significantly higher than in other types of generation. This means that nuclear power plants operate at full capacity most of the time without unscheduled shutdowns [15].

From nuclear power, the maritime industry can adopt a culture of the highest possible level of reliability and safety through automation. Of course, ships do not have the same level of redundancy as nuclear power plants. Still, the principles are similar: installing redundant systems (e.g., two independent steering gears), using constant monitoring of the hull (for corrosion and metal fatigue) with sensors, and robotizing dangerous operations (e.g., automated fire extinguishing systems that are triggered immediately upon detection of smoke without human intervention). The lesson of the nuclear industry: forecasting and prevention are cheaper and safer than responding to an accident, is certainly relevant for the maritime industry (where ship accidents can have catastrophic consequences – the death of the crew, environmental disasters in the event of oil spills).

Other energy sectors include thermal (coal and gas), hydro, and other forms of generation, as well as oil extraction and petrochemicals. In all these industries, automation is designed to maintain the continuity of equipment operation and reduce the likelihood of equipment failure and accidents. For example, the industry widely uses real-time gas turbine diagnostics systems in modern gas-fired power plants. NextEra Energy (one of the largest producers of gas and renewable energy in the US) implemented a system of 5000+ sensors on each turbine, connected to cloud analytics. ML algorithms process vibration, temperature, and exhaust gas composition indicators and predict failures 2–3 months in advance. The effect is a 23% reduction in unplanned shutdowns, resulting in annual savings of \$25 million in repairs and penalties for under-produced energy. This is an example of how Big Data-based automation, Data, and AI directly impact the enterprise economy. Similarly, the oil and gas industry has long used vibration control systems for pumps, compressors, and drilling equipment. Predictive data analysis has enabled a significant increase in the availability rate of oil platforms and refineries, reaching 98-99%. For example, according to McKinsey, petrochemical companies reduce maintenance costs by up to 30% and increase equipment uptime by 5-15% thanks to predictive systems, which in total can bring the global industry up to \$630 billion in savings every year [16].

The industry is also implementing innovative diagnostic systems in the field of energy distribution (electrical

grids). Smart Grid networks utilize sensors on lines and transformers to detect overloads or impending failures, automatically switching power to prevent outages. Automatic frequency and voltage recorders record emergency modes in milliseconds and give a command to disconnect or start the reserve. Thermal power plants utilize digital twins of boilers and turbines—mathematical models that compare calculated and actual parameters in real-time and can detect, for example, heat exchanger degradation (by decreasing efficiency) or boiler slag buildup, even before generation decreases [17].

In the context of safety, the oil and gas industry, after a series of incidents (the explosion at Deepwater Horizon, 2010), has significantly enhanced the automation of emergency response: BOP systems (blowout prevention devices) now have multi-level automatic activation to shut down the well in the event of an accident, even if there is no operator command. Firefighting on platforms and the emergency shutdown of pipeline sections in the event of depressurization are all controlled by computers at a speed unattainable by a human.

The aerospace industry (including spacecraft, satellites, and rockets) operates in conditions where direct repair is not possible, so unique approaches to autonomous monitoring and fault tolerance have been developed. Each artificial satellite in orbit is equipped with a Fault Detection, Isolation, and Recovery (FDIR) system. Detection, Isolation, and Recovery is a set of hardware and software tools that automatically detect malfunctions, isolate damaged subsystems, and restore operability by switching to a backup or restarting the system. For example, suppose a satellite's gyro orientation sensor fails. In that case, the FDIR algorithm recognizes the incorrect data within seconds, turns off the sensor, and switches to the backup, all while simultaneously sending telemetry to Earth. Most satellites have backup on-board computers that are automatically activated when the main one fails – this protects the mission from failure in the event of a single failure [18].

Modern research spacecraft (e.g., NASA's Mars rovers) use elements of artificial intelligence to diagnose their systems for anomalies. If the electrical system emits non-standard signals, automatic diagnostics attempt to determine the type of fault according to built-in rules and, if possible, correct the situation, such as rebooting the controller or switching the power to another channel. NASA is developing hierarchical hybrid diagnostic systems for future spacecraft that combine model-based and knowledge-based approaches. Experiments have shown that such algorithms can diagnose a wider range of failures than traditional methods, thereby increasing the system's autonomy. This is critical, for example, for a mission to Mars, where the signal from Earth is 10-20 minutes away – the device must make decisions itself in case of malfunctions [19].

A well-known example of emergency response automation is the Apollo system. During the Apollo lunar missions, an automatic emergency rescue program was implemented in Saturn V rockets. If the missile got out of control, the automation shot the command module with the

astronauts on parachutes. It became the prototype of modern crew emergency rescue systems (LAS) on rockets, which are triggered without human intervention in a fraction of a second. This is an illustration of the principle followed by the aerospace industry: automation must react faster than a human to save the mission or life.

Space agencies also extensively utilize digital twins and simulations for predictive maintenance. For example, engineers on Earth have a digital model of the International Space Station, which the latest data constantly updates. This allows them to predict when a stabilization gyroscope will fail – and to send a replacement in advance on the nearest cargo ship. Space technology is designed with fault tolerance in mind: «No single point of failure» – no single failure should lead to the loss of the device. Automated backup and rapid diagnostics systems achieve this principle, which maritime autonomous vessels must also consider.

In addition, automatic systems for refueling and servicing satellites in orbit are currently being developed: for example, the Orbital projects Servicing Units are robots that independently approach another satellite, dock, and perform manipulations (repair, refueling). Experimental missions have partially demonstrated such operations (MEV-1 successfully docked with the Intelsat communications satellite in 2020 and adjusted its orbit) [20].

So, the aerospace industry offers the maritime industry examples of complete autonomy and self-diagnosis.

Warehouse logistics has undergone a significant leap in automation over the past decade, marked by the widespread introduction of stacker cranes, autonomous forklifts, and conveyor systems. Although the primary goal is to increase productivity and the speed of cargo processing, warehouse automation has also had an impact on the reliability and maintenance of equipment. First, robots and conveyors are equipped with condition sensors that monitor the load on the engines, backlash of mechanisms, temperature, and other relevant parameters. This allows us to draw up a planned and predictive maintenance schedule: replace components before they fail, but not too early. According to the consulting company Westernacher, the transition from paper-based procedures to system automation in warehouses yields an average 25% increase in productivity, a 10–20% more efficient use of space, and a 15–30% reduction in inventory due to more precise management and reduced failures. In other words, a well-automated warehouse operates continuously, without delays due to breakdowns, and uses resources more efficiently.

Amazon's automated warehouses, where thousands of mobile robots deliver shelves, exemplify built-in fault tolerance: if one robot fails, the control system immediately reassigns its task to another. The faulty robot itself automatically drives to the maintenance area. Thanks to this, the order picking processes do not stop. Complete digital coordination achieves this flexibility – the central system is aware of the status of each robot and can restructure logistics in real-time.

In terms of safety and accidents, automation in warehouses has significantly reduced the number of accidents (falling shelves, forklift collisions). Robotic systems have sensors to avoid collisions; people in warehouses are equipped with personal transmitters, allowing robots to «see» them and adjust their speed accordingly. This analogy compares marine collision avoidance systems, but inside the warehouse.

Equally important, automation has enabled maintenance analytics: all robots and mechanisms log their downtime, errors, and uptime. Companies use this data to improve design and maintenance planning. For example, if a conveyor is frequently stopped due to engine overheating, an algorithm can recommend installing additional cooling or performing more frequent maintenance [21].

The maritime industry can also benefit from warehouse experience in robotic inspection and repair. Some modern warehouses already have robots that can replace a module on the line independently (when a malfunction is signaled, a robot technician is dispatched to change the conveyor motor). The maritime industry does not yet use this approach on ships, but in the future, emergency robots may be able to, for example, automatically patch a hole in the hull (install a patch) or reset a tripped circuit breaker. Logistics centers also widely use maintenance management systems: each node is assigned a «passport», and the system reminds engineers of scheduled inspections based on operating hours. This is also being transferred to the fleet – modern Fleet systems Management applies similar principles.

Thus, the logistics/warehousing industry has demonstrated the effectiveness of complete digitalization of processes, resulting in increased productivity and reliability of equipment, as well as reduced downtime losses. The maritime industry, which also includes warehousing operations (e.g., container terminals, ship holds), has already begun implementing port robots and management systems, drawing on this experience (e.g., the Rotterdam container terminal).

Adapting automation technologies in the maritime industry. By adopting best practices from other industries, the maritime industry has already begun its transformation.

Many leading shipowners have equipped their ships with remote monitoring systems for ship machinery, which feature dozens of sensors on key components, including main engines, generators, compressors, and pumps. These sensors transmit data in real time to shore-based technical support centers. For example, Rolls-Royce Marine (now part of KONGSBERG) has introduced the MarineCare service, an analogue of aviation TotalCare. The shipowner pays a fixed fee, and the supplier conducts ongoing monitoring and scheduled maintenance of its equipment. Already in 2014, each ship with a Rolls-Royce MT30 engine was supplied with 28 built-in sensors for online monitoring of its condition. SKF offers vibration monitoring systems

for a ship's shafts and propellers that warn of imbalance or wear long before an accident. These solutions have minimized unexpected breakdowns. According to reports from service companies, customers using constant monitoring are 50–60% less likely to encounter emergency failures of the main engine or propeller, as problems are detected in advance and eliminated at an early stage [9].

Condition-based maintenance (CBM) in the fleet, classification societies (DNV, Lloyd's Register, etc.) have introduced regulations that allow replacing some routine inspections with maintenance based on technical condition, provided that approved monitoring systems are in place. A ship equipped with a certified CBM system may undergo dock inspections less often if sensors confirm the satisfactory condition of the components. This encourages shipowners to invest in sensors and analytics. There are already examples of large tankers operating without unexpected repairs for over 5 years, performing all surveillance in a digital format with annual data submission to the class for analysis.

As for autonomous navigation and safety systems, almost all commercial vessels are equipped with ECDIS (Electronic Chart Display Information System) with routing functions, autopilots, and AIS (Automatic Identification System) for data exchange (Fig. 1). A modern ship's autopilot is a cybernetic system that can maintain a course and speed, considering wind, currents, and other environmental factors. This is not complete autonomy, but it does significantly alleviate the crew's workload. Collision avoidance systems, based on radar and AIS, can signal or even intervene (via the autopilot) to prevent an accident. Thus, the elements of automatic accident prevention are already in place. For example, if the watch officer falls asleep, a modern system will detect a dangerous approach to another vessel and raise an alarm or correct the course. This principle was borrowed from aviation TCAS and adapted for use in a maritime context [8].

Drones and robotic inspections are also being introduced. In recent years, classification societies have begun to approve the use of drones for inspecting ship hulls and tanks. For example, DNV and ABS have certified the technology for inspecting ballast tanks using drones equipped with high-definition cameras. The drone can fly inside the tank, inspect the condition of bulkheads, detect cracks or corrosion – all without the need for a person to be deployed in a hazardous space. Cyberhawk has completed a full inspection of 19 tanks on an oil tanker using drones, receiving class approval. This significantly increases safety (people are less likely to descend into confined spaces) and can be performed more frequently than manual inspections, so problems are noticed promptly. The industry is also introducing underwater drones, known as ROVs, to inspect the underwater portion of the hull and propeller steering group, eliminating the need for divers.

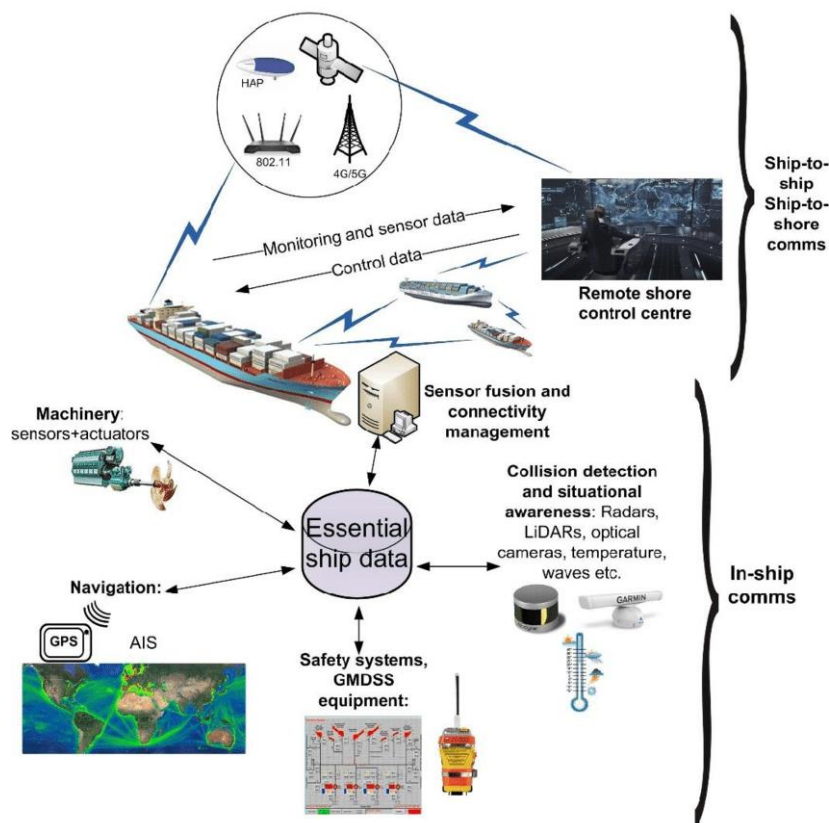


Figure 1 – CBM systems and digital platforms on a merchant fleet [22]

As for digital fleet management systems, most large shipowners use software packages for maintenance planning, spare parts inventory, and vessel status tracking (ShipManager, AMOS, Danaos). Integrated data received from vessels (via satellite) – engine performance, fuel consumption, alarm status is analyzed in a unified manner (StarConnect). This is a comprehensive step towards an intelligent fleet, where decisions are made based on data, not just the captain's intuition.

Regarding the automation of emergency work on ships. Drawing inspiration from logistics warehouses and nuclear safety, shipbuilders have begun developing robotic systems for emergencies. Gas analyzer robots that can move around the boat to search for the source of a fire or gas leak, and autonomous fire modules that navigate the hold and extinguish flames point by point. Such systems are not yet commercial, but prototypes exist. In the future, the ship's hull may have a network of built-in repair drones that can quickly patch small holes (using fast-hardening materials) or install a bandage on a leaking pipe. This is a development of the ideas of self-healing, inspired by both biology (the immune system) and NASA practice (a spacecraft should «heal» itself if possible).

Considering unimplemented or underdeveloped practices, the following can be distinguished:

- Crew Management, Resources Management, and pilot training from mistakes, in cargo transportation – fatigue warning. In the fleet, this is only developing;

- It makes sense to adopt the practice of sharing anonymous incident reports and designing system interfaces with the human factor in mind – similar programs (like ASRS in aviation) would help reduce accidents at sea;

- Stationary control points in the railway industry may also have an analogue – in shipping, there are nodal points (e.g., canals or straits) where scanners of passing hulls can be installed to detect damage or fouling;

Thus, the maritime industry is in a state of active modernization, implementing the achievements of «adjacent industries». Much of the above seemed like fantasy a few years ago (unmanned vessels, drone inspectors), but now it is already working or being tested.

As a separate conclusion, it is necessary to emphasize the importance of developing PdM of the fleet. Historically, ship maintenance was based on the planned preventive principle: after a set time or operating period, routine work was performed. This led to either excessive maintenance (incurring extra costs and replacing still serviceable parts) or insufficient maintenance when a failure occurred between scheduled routines. The transition to condition-based maintenance, utilizing sensors and analytics, enables the avoidance of both extremes. Modern large fleets – including tankers and container ships – already use data collection systems, but not all of them have learned to derive predictive value from this data. Therefore, one of the priorities is the creation of reliable forecasting models for marine equipment. For example, researchers are developing

models to predict the remaining resource of propeller shaft bearings based on the vibration spectrum and oil temperature. Others are analyzing the electrical signals of generators to detect burns in the windings early. These efforts are gradually materializing in the form of software products that will be installed on ships or in shore-based centers.

Predictive maintenance provides not only an economic effect, but also a safety effect: a ship whose engine is serviced according to the actual condition is much less likely to lose its propulsion in the middle of the ocean. For the crew, this means less stress and risk. The already mentioned transition of most companies to PdM is expected to be the new norm in the coming decade. Imagine that the ship of the future sets off on a voyage with a “healthy” passport: all systems are in working order, and there is a forecast of when and which of them will require intervention. During the voyage, the system itself monitors the parameters; if something approaches the limit, it warns the team and the company to order a spare part to the port of destination. This is the ultimate goal – maximum fault tolerance through proactive maintenance. This transition is supported by classifiers: in 2021, DNV issued documents regulating the implementation of a data-based class («Data

Driven Classification»)), where the frequency of inspections depends on the actual condition.

Experience from other industries already shows that the maritime industry can achieve figures of a 2-6% increase in fleet availability, a 10-40% reduction in emergency repairs, and a 5-10% reduction in spare parts costs through optimization. Of course, the conservative maritime industry needs evidence and standards. Therefore, demonstration projects are underway: for example, Shell is conducting a PdM pilot project on its gas carriers, achieving reduced downtime and fuel savings. Such cases will gradually convince the market of the viability of new approaches.

Predictive maintenance can be seen as a key node where all innovations converge: sensors (IoT), connectivity, big data, and artificial intelligence, all for the purpose of predicting and preventing failures. The maritime industry, by integrating these tools, will enter a new era of reliability and safety, equal to the aviation and energy sectors. Everyone benefits: shipowners – from reduced costs and downtime, crews – from reduced emergencies, the environment – from fewer accidental emissions and spills. Table 1 provides a summary of best practices.

Table 1

Various best cross-industry practices and their adoption status

Best Practice	Adoption status	Comment
Remote monitoring systems	Adopted	Used for key machinery, such as engines and pumps. Example: Kongsberg's MarineCare service.
Condition-Based Maintenance (CBM)	Adopted	Classification societies permit the replacement of some routine inspections if certified CBM systems are utilized.
Autonomous navigation & safety	Adopted	Almost all vessels are equipped with ECDIS, autopilots, and AIS for navigation and collision avoidance.
Drone/robotic inspections (aerial)	Adopted	Drones are certified and used to inspect ship hulls and tanks, improving safety.
Digital fleet management systems	Adopted	Most large shipowners utilize software such as ShipManager or AMOS for planning and tracking purposes.
Predictive Maintenance (PdM)	In early transition	Expected to be the new norm, pilot projects by companies like Shell show reduced downtime.
Underwater drones (ROVs)	In development	Used to inspect the underwater portion of the hull, replacing the need for divers.
Crew & resource management	In development	Practices like fatigue warnings are still in the early stages of adoption in the maritime industry.
Robotic systems for emergencies	Not yet adopted	Prototypes for robotic firefighting and gas leak detection exist, but they are not yet commercially available.
Sharing anonymous incident reports	Not yet adopted	A proposed practice, like aviation's ASRS, to help reduce accidents at sea.
Stationary hull scanners	Not yet adopted	A proposed idea is to install scanners at choke points, such as canals, to detect hull damage.

Conclusions

The introduction of automation technologies from other industries into the maritime sphere is already yielding tangible results. The cross-industry exchange of engineering practices is a powerful driver of innovation in the maritime industry. Aviation teaches the sea to predict failures, IT teaches the sea to build fault-tolerant systems, railways teach the sea to control infrastructure remotely, and space teaches the sea to trust autonomous algorithms. The maritime industry has historically developed more slowly. However, now that it has absorbed these lessons, it is leaping towards a digital, automated future, where automation minimizes human errors and the reliability and safety of transportation reach unprecedentedly high levels.

The experience in aviation, rail, road transport, energy, logistics, and aerospace confirms that implementing automated monitoring, predictive diagnostics, and autonomous emergency systems enables significant increases in reliability, reductions in accidents, and cost savings.

Prospects for further research include standardizing the implementation of PdM across the fleet, developing digital twins of ships, examining the effectiveness of drones and robots for technical inspections, and establishing maritime technical incident sharing platforms, such as ASRS.

References

- [1] A.S. Kalafatelis, N. Nomikos, A. Giannopoulos, G. Alexandridis, A. Karditsa, and P. Trakadas, "Towards Predictive Maintenance in the Maritime Industry: A Component-Based Overview," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, no. 3, article 425, 2025. doi: 10.3390/jmse13030425.
- [2] Adortech Technical Blog. Minimizing railway downtime with predictive maintenance in railway, 2024. [Online]. Available: <https://adortech.com/blog/minimizing-railway-downtime-with-predictive-maintenance-in-railway>. Accessed on: September 15, 2025.
- [3] H. Canaday, What's holding back predictive maintenance? Aviation Week Network, 2020. [Online]. Available: <https://aviationweek.com/mro/whats-holding-back-predictive-maintenance>. Accessed on: September 15, 2025.
- [4] Zhong Hong. Predictive Maintenance in Manufacturing: Reducing Downtime and Costs with AI, 2025. [Online]. Available: <https://medium.com/@zhonghong9998/predictive-maintenance-in-manufacturing-reducing-downtime-and-costs-with-ai-3374290c1388>. Accessed on: September 15, 2025.
- [5] A.K.J. Low, K.S. Sim, and K.L. Lew, "Review on Automated Storage and Retrieval System for Warehouse," *Journal of Informatics and Web Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 77-97, 2024. doi: 10.33093/jiwe.2024.3.3.5.
- [6] DOE Open Energy Data Initiative (OEDI); National Renewable Energy Laboratory, March 2014, "Wind Turbine Gearbox Condition Monitoring Vibration Analysis Benchmarking Datasets," U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. doi: 10.25984/1844194.
- [7] Renewable Energy World. Smart monitoring is the key to unlocking more value from wind energy, 2025. [Online]. Available: <https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/turbines-equipment/smart-monitoring-is-the-key-to-unlocking-more-value-from-wind-energy/>. Accessed on: September 15, 2025.
- [8] B. Svilicic, I. Rudan, A. Jugović, and D. Zec, "A Study on Cyber Security Threats in a Shipboard Integrated Navigational System," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, no. 10, article 364, 2019. doi: 10.3390/jmse7100364.
- [9] Riviera Maritime Media. Remote monitoring moves to the mainstream, 2015. [Online]. Available: <https://www.rivieramm.com/opinion/opinion/remote-monitoring-moves-to-the-mainstream-36670>. Accessed on: September 15, 2025.
- [10] Annual Review 2025. International Air Transport Association. 2025. 59 p. [Online]. Available: <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2025.pdf>. Accessed on: September 15, 2025.
- [11] Predictive maintenance of rail infrastructure, 2023. [Online]. Available: <https://www.brunel.ac.uk/research/projects/predictive-maintenance-of-rail-infrastructure>. Accessed on: September 15, 2025.
- [12] D.G. Kidd, "Improving the safety relevance of automatic emergency braking testing programs: An examination of common characteristics of police-reported rear-end crashes in the United States," *Traffic Injury Prevention*, vol. 23, no. sup1, 2022. doi: 10.1080/15389588.2022.2090544.
- [13] Safety of nuclear power plants: Commissioning and operation: specific safety requirements. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. 55 p.
- [14] World Nuclear Association. Safety of nuclear power reactors. 2025 [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors>. Accessed on: September 15, 2025.
- [15] Nuclear power is the most reliable energy source and it's not even close, Office of Nuclear Energy, 2021 [Online]. Available: <https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-power-most-reliable-energy-source-and-its-not-even-close>. Accessed on: September 15, 2025.
- [16] Proven Advanced Predictive Maintenance for Energy & Utilities, Number Analytics, 2025. [Online]. Available: <https://www.numberanalytics.com/blog/proven-advanced-predictive-maintenance-energy-utilities>. Accessed on: September 15, 2025.
- [17] E. J. Husom et al., "Sustainable LLM Inference for Edge AI: Evaluating Quantized LLMs for Energy

Efficiency, Output Accuracy, and Inference Latency,” *ACM Transactions on Internet of Things*, pp. 1-34, 2025. doi: 10.1145/3767742.

- [18] S. Jalilian, F. SalarKaleji, and T. Kazimov, “Fault detection, isolation and recovery (FDIR) in satellite onboard software,” *Program mühəndisliyinin aktual elmi-praktiki problemləri I respublika konfransının materialları*, Bakı, Azərbaycan, May 17, 2017, pp. 329-332. doi: 10.25045/ncsofteng.2017.87.
- [19] A. Menon, Automation and robotics in space, Blue Marble Space Institute of Science, 2021. [Online]. Available: <https://bmsis.org/automation-and-robotics-in-space>. Accessed on: September 15, 2025.
- [20] S. Lee. The predictive Maintenance Impact on Aerospace&Defense. Number Analytics. 2025 [Online]. Available: <https://www.numberanalytics.com/blog/the-predictive-maintenance-impact>. Accessed on: September 15, 2025.
- [21] B. Gokulakannan, B. Danush, and J. Senthil Kumar, “Autonomous with GPS based controlled mobile robot for material handling in warehouse,” *Journal of Dynamics and Control*, vol. 9, no. 3, pp. 60-69, 2025. doi: 10.71058/jodac.v9i3004.
- [22] M. Hoyhtya, J. Huusko, M. Kiviranta, K. Solberg, and J. Rokka, «Connectivity for autonomous ships: Architecture, use cases, and research challenges», in *2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Korea, Oct. 8-20, 2017, pp. 345-350. doi: 10.1109/ictc.2017.8191000.

ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ В ОБСЛУГОВУВАННІ СУДНОВИХ СИСТЕМ: ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ ЧЕРЕЗ МІЖГАЛУЗЕВИЙ ДОСВІД

- Самойлов О.О.** здобувач ступеня PhD, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6711-4769>, e-mail: oleksii.samoilov.ksma@gmail.com;
- Сіманенков А.Л.** канд. техн. наук, ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0797-5276>, e-mail: simanenkov.andrii@gmail.com

Розглянуто міжгалузеве запозичення передових технологій автоматизації з авіаційної, залізничної, автомобільної, енергетичної, аерокосмічної та логістичної сфер для підвищення надійності, безпеки та ефективності технічного обслуговування морського транспорту. Зроблено акцент на важливості переходу від традиційного регламентного обслуговування до підходів, що базуються на фактичному технічному стані та прогнозуванні відмов. На основі аналізу сучасних рішень в інших галузях, розглянуто можливості адаптації таких інновацій у морській індустрії: впровадження дистанційного моніторингу обладнання, цифрових двійників, IoT (інтернет речей)-сенсорів, систем діагностики та машинного навчання для аналізу технічного стану, використання дронів та автономних роботів для інспекції та аварійних робіт, а також розробка комплексних цифрових платформ управління технічним обслуговуванням. Стаття демонструє, що такі технології вже довели свою ефективність у суміжних секторах – зниження кількості аварій на 30–70%, зменшення витрат на ремонти до 40%, скорочення простоїв на 20–50%. Водночас у морській галузі ці підходи все ще впроваджуються повільно, що зумовлено нестачею відкритих баз для навчання моделей прогнозування та відсутністю єдиних стандартів обміну технічною інформацією. Підкреслено необхідність системного підходу до інтеграції прогнозного обслуговування у морський транспорт, створення нормативної бази, розвитку цифрової інфраструктури флоту, підготовки персоналу до роботи з новими інструментами моніторингу й аналізу. У роботі наведено приклади вже реалізованих ініціатив: дистанційний моніторинг суднових енергетичних установок, використання сертифікованих дронів для інспекції танків, аналітичні платформи управління обслуговуванням флоту, а також описано потенційні майбутні розробки – дрони-ремонтники, автономні модулі пожежогашіння, цифрові паспорти “здоров’я” суден. Результати дослідження свідчать, що саме впровадження прогнозного обслуговування може стати ключовим напрямом цифрової трансформації морської індустрії. Це дозволить не лише підвищити безвідмовність суден і безпеку екіпажів, але й суттєво знизити експлуатаційні витрати, мінімізувати екологічні ризики та забезпечити вищий рівень готовності флоту до сучасних викликів.

Ключові слова: морська індустрія, автоматизація, міжгалузевий досвід, прогнозне обслуговування, обслуговування за станом, дистанційний моніторинг, штучний інтелект, надійність.

Перелік використаних джерел

- [1] Towards Predictive Maintenance in the Maritime Industry: A Component-Based Overview / A. S. Kalafatelis et al. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025. Vol. 13, no. 3. Article 425. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse13030425>.
- [2] Adortech Technical Blog. Minimizing railway downtime with predictive maintenance in railway. URL: <https://adortech.com/blog/minimizing-railway->

- [downtime-with-predictive-maintenance-in-railway](#) (дата звернення: 15.09.2025).
- [3] Canaday H. What's holding back predictive maintenance? Aviation Week Network. URL: <https://aviationweek.com/mro/whats-holding-back-predictive-maintenance> (дата звернення: 15.09.2025).
- [4] Zhong Hong. Predictive Maintenance in Manufacturing: Reducing Downtime and Costs with AI. URL: <https://medium.com/@zhonghong9998/predictive-maintenance-in-manufacturing-reducing-downtime-and-costs-with-ai-3374290c1388> (дата звернення: 15.09.2025).
- [5] Low A. K. J., Sim K. S., Lew K. L. Review on Automated Storage and Retrieval System for Warehouse. *Journal of Informatics and Web Engineering*. 2024. Vol. 3, no. 3. Pp. 77-97, DOI: <https://doi.org/10.33093/jiwe.2024.3.3.5>.
- [6] Sheng S. Wind Turbine Gearbox Condition Monitoring Vibration Analysis Benchmarking Datasets. Data set. Open Energy Data Initiative (OEDI). National Renewable Energy Laboratory, 2014. DOI: <https://doi.org/10.25984/1844194>.
- [7] Renewable Energy World. Smart monitoring is the key to unlocking more value from wind energy, URL: <https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/turbines-equipment/smart-monitoring-is-the-key-to-unlocking-more-value-from-wind-energy/> (дата звернення: 15.09.2025).
- [8] Svilicic B., Rudan I., Jugović A., Zec D. A Study on Cyber Security Threats in a Shipboard Integrated Navigational System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019. Vol. 7, no. 10. Article 364. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7100364>.
- [9] Riviera Maritime Media. Remote monitoring moves to the mainstream. URL: <https://www.rivieramm.com/opinion/opinion/remote-monitoring-moves-to-the-mainstream-36670> (дата звернення: 15.09.2025).
- [10] Annual Review 2025. International Air Transport Association. 2025. 59 p. URL: <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2025.pdf> (дата звернення: 15.09.2025).
- [11] Predictive maintenance of rail infrastructure. URL: <https://www.brunel.ac.uk/research/projects/predictive-maintenance-of-rail-infrastructure> (дата звернення: 15.09.2025).
- [12] Kidd D. G. Improving the safety relevance of automatic emergency braking testing programs: An examination of common characteristics of police-reported rear-end crashes in the United States. *Traffic Injury Prevention*. 2022. Vol. 23, no. sup1. DOI: <https://doi.org/10.1080/15389588.2022.2090544>.
- [13] Safety of nuclear power plants: Commissioning and operation: specific safety requirements. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. 55 p.
- [14] World Nuclear Association. Safety of nuclear power reactors. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors> (дата звернення: 15.09.2025).
- [15] Nuclear power is the most reliable energy source and it's not even close. URL: <https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-power-most-reliable-energy-source-and-its-not-even-close> (дата звернення: 15.09.2025).
- [16] Proven Advanced Predictive Maintenance for Energy & Utilities, Number Analytics. URL: <https://www.numberanalytics.com/blog/proven-advanced-predictive-maintenance-energy-utilities> (дата звернення: 15.09.2025).
- [17] Sustainable LLM Inference for Edge AI: Evaluating Quantized LLMs for Energy Efficiency, Output Accuracy, and Inference Latency / E. J. Husom et al. *ACM Transactions on Internet of Things*. 2025. Pp. 1-34. DOI: <https://doi.org/10.1145/3767742>.
- [18] Jalilian S., SalarKaleji F., Kazimov T. Fault detection, isolation and recovery (FDIR) in satellite onboard software. *Program mühəndisliyin aktual elmi-praktiki problemləri I respublika konfransının materialları*, Bakı, Azərbaycan, 17 May 2017. Pp. 329-332. DOI: <https://doi.org/10.25045/ncsofteng.2017.87>.
- [19] Menon A. Automation and robotics in space, Blue Marble Space Institute of Science. URL: <https://bmsis.org/automation-and-robotics-in-space> (дата звернення: 15.09.2025).
- [20] Lee S. The predictive Maintenance Impact on Aerospace&Defense. URL: <https://www.numberanalytics.com/blog/the-predictive-maintenance-impact> (дата звернення: 15.09.2025).
- [21] Gokulakannan B., Danush B., Senthil Kumar J. Autonomous with GPS based controlled mobile robot for material handling in warehouse. *Journal of Dynamics and Control*. 2025. Vol. 9, no. 3. Pp. 60-69. DOI: <https://doi.org/10.71058/jodac.v9i3004>.
- [22] Connectivity for autonomous ships: Architecture, use cases, and research challenges / M. Hoyhtya et al. 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, Korea, 8-20 Oct. 2017. Pp. 345-350. DOI: <https://doi.org/10.1109/ictc.2017.8191000>.

Стаття надійшла 01.10.2025

Стаття прийнята 22.10.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Samoilov O. O., Simanenkov A. L. Automation technologies in ship systems maintenance: problems and ways to improve through cross-sector experience. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 197-207. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344906>.

163 БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.75+004.932.2:616

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344911

МЕТОД ЗБЕРЕЖЕННЯ ЦИФРОВИХ МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ВИКОРИСТАННЯ В ЛІКУВАЛЬНО-ДІАГНОСТИЧНОМУ ПРОЦЕСІ

Козак Л.М.	д-р біол. наук, ст. наук. співробітник, Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7412-3041 , e-mail: lmkozak52@gmail.com ;
Романюк О.О.	д-р філософії, Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6865-1403 , e-mail: ksnksn7@gmail.com ;
Коваленко О.С.	д-р мед. наук, професор, Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7412-3041 , e-mail: lmkozak52@gmail.com ;
Пезенцалі Г.О.	канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6319-6993 , e-mail: annp.irtc@gmail.com ;
Азархов О.Ю.	д-р мед. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2085-4786 , e-mail: alexazarhov@gmail.com

Інформаційні технології оброблення, аналізу, зберігання та обміну цифровими медичними даними є основою цифрової трансформації в галузі охорони здоров'я. Наразі актуальною є інтеграція медичних інформаційних систем (МІС), різних електронних ресурсів та різномірних засобів програмного забезпечення в інтегровану екосистему цифрової медицини. Для забезпечення ефективного використання цифрових медичних даних широко використовуються хмарні технології, які надають доступ до програм та даних з мінімальним використанням інфраструктури всередині установи охорони здоров'я. Метою роботи є розроблення методу збереження цифрових медичних зображень для подальшого використання в лікувально-діагностичному процесі з врахуванням особливостей внутрішніх процесів інформаційного обміну у закладі охорони здоров'я (ЗОЗ) та із забезпечення потреби інформаційної взаємодії двох чи більше таких установ. Запропонований метод складається з чотирьох етапів збереження сформованого зображення на різних рівнях подальшого зберігання за стандартом DICOM: у БД інформаційно-діагностичної системи, PACS, у сховищі тривалого зберігання. Останній етап забезпечує анонімізацію даних для подальшого використання за межами ЗОЗ. Розроблений метод збереження цифрових медичних зображень містить покроковий опис дій з використанням дескриптивної логіки, що дає змогу формалізувати весь процес зберігання медичної інформації.

Ключові слова: інформаційна технологія, цифрова медицина, збереження, цифрові медичні зображення, хмарні технології, метод, модель, цифрові медичні дані.

Постановка проблеми

Інформаційні технології оброблення та аналізу складної медичної інформації, телемедицина, запровадження електронних медичних записів у практичну медицину, медичні пристрої, які підтримують штучний інтелект, – це лише кілька конкретних прикладів цифрової трансформації в галузі охорони здоров'я, які повністю змінюють спосіб взаємодії з медичними працівниками, спосіб обміну даними між провайдером та способи прийняття рішень щодо планів діагностики, лікування, реабілітації та профілактики здоров'я [1]. Великого значення набувають інформаційні технології аналізу медичної інформації різного виду, обміну медичними даними, який здійснюється між закладами та організаціями охорони здоров'я, сховищами даних та різними засобами, які функціонують в середовищі

мобільної медицини чи телемедицини. Для підтримки процесу збереження цифрових медичних даних, зокрема зображень, що є предметом дослідження цієї статті, необхідно враховувати принципи масштабованості, ієрархічності, інтероперабельності та орієнтованості на пацієнта, забезпечувати відповідність сучасним комунікаційним та інформаційним стандартам та убезпечувати захист персональних медичних даних. Розроблення та використання методу збереження цифрових медичних зображень (ЦМЗ) забезпечить поетапне створення та зберігання файлів досліджень на різних платформах цифрових сховищ. Це, в свою чергу, зумовить надання необхідної інформаційної підтримки на всіх етапах діагностики, лікування та реабілітації пацієнтів завдяки підвищенню якості та повноти наявних даних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Один з основних принципів цифрової медицини є принцип покращення інформаційної доступності. Цей принцип передбачає уможливлення оперативного доступу до необхідної медичної інформації, що забезпечують мобільна медицина та інтернет мережа [2, 3], сприяє накопиченню знань про особливості функціонування організму людини за різних умов [4, 5], підтримує прийняття рішення лікарем та пацієнтом на основі повнішої та оперативнішої інформації [6-8], забезпечення конфіденційності медичних даних [9] і, як наслідок, забезпечує покращення індивідуального та популяційного здоров'я [10].

Медичні зображення дають основний обсяг інформації про пацієнта разом з метаданими, які мають інформацію про протоколи одержання цих зображень. За сучасних умов в ЗОЗ встановлюються системи архівування, що забезпечують керування цифровими медичними даними. Система отримання, аналізу, обробки, обміну та архівування медичних зображень – PACS (Picture Archiving and Communication Systems), займає перші місця у використанні в секторі медицини як система, орієнтована на зменшення витрат, збільшення продуктивності і швидкості архівування, читання, поширення та подання в електронному форматі медичних зображень [11, 12].

Запропонована Концепція розвитку електронної охорони здоров'я в Україні на 2018-2020 роки, яку продовжено до 2025 зі змінами до цієї концепції, передбачає як удосконалення наявних ІТ, так і розвиток систем підтримки клінічних рішень, персоналізованої медицини, ресурсів зберігання та систем оброблення великих масивів даних з залученням методів штучного інтелекту [13]. Серед ключових аспектів Концепції визначено вимоги до розроблення сервісів електронної системи охорони здоров'я, забезпечення сумісності та електронної взаємодії центральної бази даних електронної системи охорони здоров'я з іншими інформаційно-комунікаційними системами, державними і міжнародними інформаційними ресурсами. Розроблена Електронна система охорони здоров'я України (ЕЗОЗ) має єдину державну БД з реєстрами та програмним забезпеченням для наповнення кількох реєстрів (пацієнтів, медичних записів, медичних висновків тощо) [14].

Проблема інформаційної взаємодії локальних систем на рівні інтегрованої екосистеми цифрової медицини вирішується застосуванням міжнародних інформаційних стандартів, зокрема FHIR (HL7), який є стандартом та середовищем нового покоління. В 2025 році прийнято і опубліковано міжнародний стандарт Керівних принципів впровадження HL7 FHIR на основі ISO 13940:2015 (Система концепцій для підтримки безперервності медичної допомоги), ISO 13606-1:2019 (Довідкова модель) та ISO 13606-3:2019 (Довідкові архетипи та списки термінів).

Також зазначимо, що наразі дуже широко використовуються хмарні технології як одне з найкращих

рішень у питаннях збереження та обміну цифровими медичними даними великого обсягу [15]. Такі технології надають доступ до програм та даних з мінімальним використанням інфраструктури всередині установи охорони здоров'я.

Мета статті

Розробити метод збереження цифрових медичних зображень для подальшого використання в лікувально-діагностичному процесі з врахуванням особливостей внутрішніх процесів інформаційного обміну у закладі охорони здоров'я (ЗОЗ) та із забезпечення потреби інформаційної взаємодії двох чи більше таких установ.

Виклад основного матеріалу

Метод збереження цифрових медичних зображень для подальшого використання в лікувально-діагностичному процесі. В основу методу покладено аналіз життєвого циклу медичних зображень за період з моменту потрапляння даних у конкретну систему архівування і до моменту їх повного видалення. Розроблений метод базується на покрокових моделях опрацювання даних для їхнього збереження та охоплює такі етапи.

I етап – створення та збереження файлу дослідження. Для будь-якої інформаційно-діагностичної системи (ІДС, modality) створюємо цифровий файл (fileData) в стандарті DICOM, для якого характерні розширення *.dcm, та двокомпонентну структуру (Header), в якій прописано метадані (про пацієнта, дата та тип дослідження тощо) та дані про зображення з інтенсивністю забарвлення пікселів у відтінках сірого (ImageDataset). У модельному вигляді цей процес записується:

```


$$\exists \text{modality} \sqsubseteq \text{fileData} \sqsubseteq \text{create.}(\text{newFileData} \sqsubseteq \text{DICOMStandart}) \rightarrow \text{newFileData} \sqsubseteq \text{DICOMStandart} \sqsubseteq \text{has.} \\ (\text{Prefix.DCIM} \sqsubseteq \text{Header} \sqsubseteq \text{ImageDataset}),$$


```

де Header складається з таких даних:

- блок даних про пацієнта (patientData), що вноситься користувачем (set.USER),
- інформація про дослідження – дата та час дослідження (studyData), заповнюються користувачем та генеруються автоматично (set.(USER $\sqcup$ GENERATED)),
- дані про ІДС (modalityData), які мають фіксовані налаштування (set.FIXET).

```


$$\forall \text{Header} \sqsubseteq \text{has.Dataset}(\text{patientData} \sqcap \text{studyData} \sqcap \text{modalityData}) \rightarrow \\ \text{patientData} \sqsubseteq \text{set.USER}, \\ \text{studyData} \sqsubseteq \text{set.}(\text{USER} \sqcup \text{GENERATED}), \\ \text{modalityData} \sqsubseteq \text{set.FIXET}.$$


```

ImageDataset має значення інтенсивності забарвлення пікселів (інформація за тегом 7FE0):

```


$$\forall \text{ImageDataset} \sqsubseteq \text{has.} \\ (\text{ImagePixelIntensityData} \sqsubseteq \text{Header} \sqcap \text{tag}(7FE0)).$$


```

Виконання вимог стандарту DICOMStandart відповідає DICOM-зображенню (DICOMImage), яке зберігається в ІДС та, за потреби, копіюється на оптичні носії (opticalDevice) і в подальшому видаляється:

$\exists \text{newFileData} \sqcup \text{DICOMStandart} \sqsubseteq \text{DICOMImage}$
 $\forall \text{DICOMImage} \sqsubseteq \text{save.}(\text{modality} \sqcup \text{opticalDevice})$

$\forall \text{DICOMImage} \sqsubseteq \text{delete.}$
 $(\text{waitTime} \sqcup \text{storageCapacityFull})$

Завершення I етапу полягає в отриманні цифрового медичного зображення стандартного формату для подальшого використання в лікувально-діагностичному процесі (рис. 1).

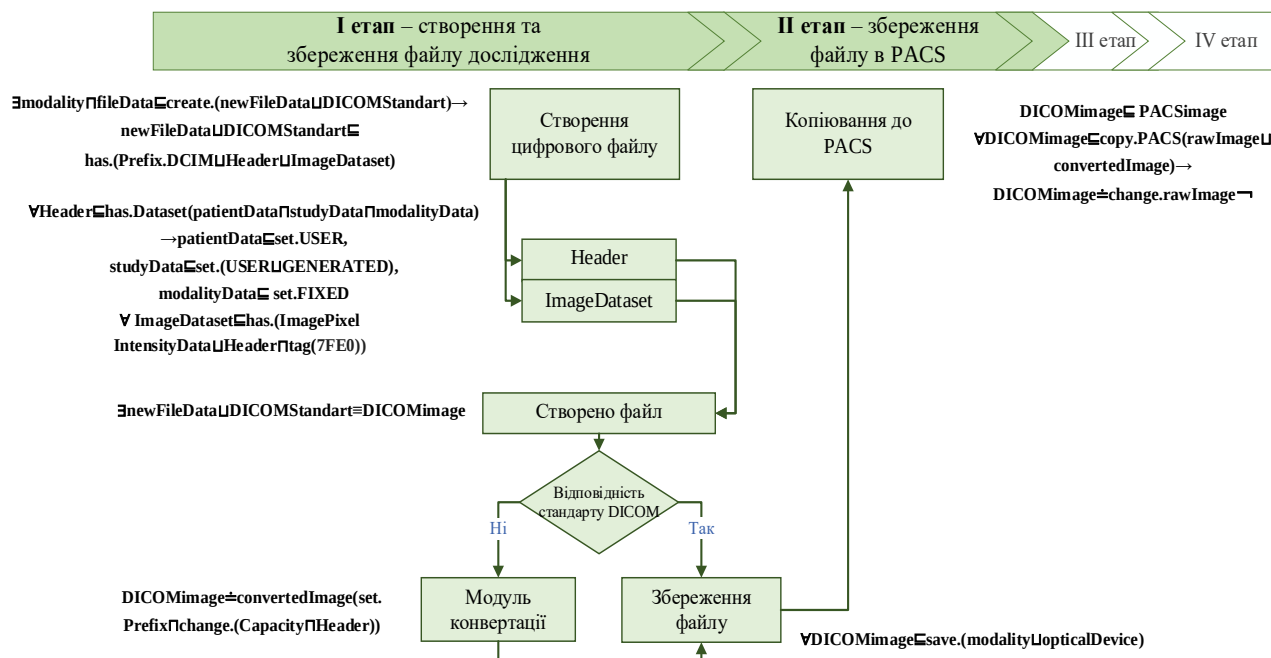


Рис. 1 – Метод збереження цифрових медичних зображень: I та II етапи

II етап – збереження файлу в PACS. Цей етап є необхідним для формування електронної медичної карти пацієнта під час лікування в ЗОЗ для оперативного доступу до всіх необхідних медичних даних.

DICOM-зображення копіюються до PACS (copy.PACS) в необробленому (rawImage) чи в обробленому (convertedImage) вигляді, саме коли файл змінює об'єм (Capacity), кодування в Header або розширення, наприклад, з *.dic на *.dcm або .v2, залежить від налаштування PACS:

$\forall \text{DICOMImage} \sqsubseteq \text{copy.PACS}(\text{rawImage} \sqcup \text{convertedImage}) \rightarrow$

$\text{DICOMImage} \sqsubseteq \text{change.rawImage} \sqsubseteq$

$\text{DICOMImage} \sqsubseteq \text{convertedImage} \sqsubseteq$

$(\text{set. Prefix} \sqcup \text{change.}(\text{Capacity} \sqcup \text{Header}))$

$\text{DICOMImage} \sqsubseteq \text{PACSimage}$

Завершенням II етапу є створення цифрової копії результату дослідження в системі PACS для її зберігання на час лікування пацієнта.

Для проведення якісного лікування, для кращого розуміння стану в динаміці, необхідні історичні медичні дані пацієнта за великий проміжок часу. Оскільки ємність необхідного дискового простору в ЗОЗ має обмежений об'єм, ЦМЗ на цьому етапі переносять до сховища тривалого зберігання.

III етап – перенесення даних до сховища тривалого зберігання (LT) (рис. 2). В першу чергу дані з PACS копіюються до LT (imagePath), про це ставиться відмітка (copyMark) в базі даних DB(imagePath $\sqcup$ copyMark):

$\forall \text{PACSimage} \sqsubseteq \text{copy.LT} \sqcup \text{set.DB}(\text{imagePath} \sqcup \text{copyMark}), \text{PACSimage} \sqsubseteq \text{LTimage.}$

Далі за розкладом відбувається очищення дискового простору PACS:

$\forall \text{PACSimage} \sqsubseteq \text{use.}(\text{timeSchedule} \sqcup \text{capSchedule}).$

Очищення здійснюється за часом (timeSchedule) – на N-день файл видаляється, про що ставиться відмітка в базі даних set.DB(clearMark):

$\text{timeSchedule} \sqsubseteq \text{wait.Nday} \sqcup \text{set.DB}(\text{clearMark}) \sqcup \text{delete.}$

$\text{PACSimage}(\text{imagePath} \sqcup \text{copyMark}).$

Очищення за об'ємом (capSchedule) – якщо досягається запланований максимальний об'єм використаного дискового (HardspaceCapacityAbove) простору, в запланований час (datetimeSet) видаляються файли за певними сценаріями (routine):

$\text{capSchedule} \sqsubseteq \text{watch.HardspaceCapacityAbove} \sqcup \text{wait. datetime-}$

$\text{Set} \sqcup \text{set.DB}(\text{clearMark}) \sqcup \text{use.}(\text{routineAll} \sqcup \text{routineNew} \sqcup \text{routineCap}),$

- видалення всіх даних (routineAll):

$\text{routineAll} \sqsubseteq \exists \text{delete. PACSimage;}$

- видалення даних (routineNew) старіше певного часу (olderNdayMark):

routineNew $\sqsubseteq$ delete.(PACSimageFolderNdayMark);

- видалення старіших даних до налаштованого дискового об'єму (HardspaceCapacityBelow):

routineCap $\sqsubseteq$ delete.

(PACSimageHardspaceCapacityBelow).

Отже, III етап закінчується збереженням в сховищі тривалого зберігання цифрової копії дослідження для подальшого використання даних за вимогою від лікаря або пацієнта (рис. 2).

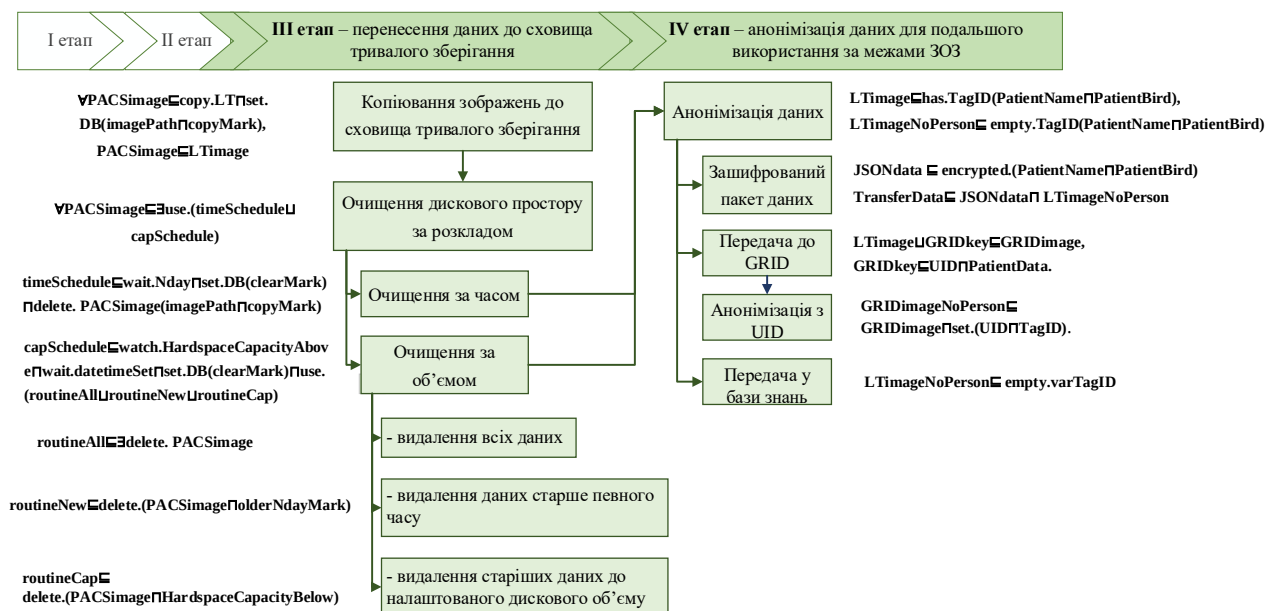


Рис. 2 – Метод збереження цифрових медичних зображень: III та IV етапи

IV етап – анонімізація даних для подальшого використання за межами ЗОЗ здійснюється у випадку, коли необхідний обмін ЦМЗ здійснюється за межами ЗОЗ та МІС цих закладів. Оскільки DICOM-зображення має вбудовані теги для ідентифікації атрибутів, то запит про пацієнта та результати його досліджень проводиться, використовуючи тег (0010;0020) PatientID, який є унікальним ідентифікаційним номером в системі. Теги, які несуть в собі інформацію про прізвище та ім'я пацієнта PatientName (0010;0010) та його дату народження PatientBirth (0010;0030), проходять процес анонімізації – видаляються персональні дані пацієнта шляхом затирання даних, з попереднім записом в БД унікального ідентифікатора PatientID в поєднанні з PatientName та PatientBirth для можливого відновлення даних.

Для безпечної передачі даних між МІС різних ЗОЗ через незахищене середовище, DICOM-зображення проходить процес анонімізації, відповідні теги (TagID(PatientName $\sqcup$ PatientBirth)) замінюються нулями або зірочками (*) і створюється зашифрований JSON-файл (JSONdata), в якому записана потрібна інформація:

$\text{LTimage} \sqsubseteq \text{has.TagID(PatientName} \sqcup \text{PatientBirth),}$
 $\text{LTimageNoPerson} \sqsubseteq \text{empty.TagID(PatientName} \sqcup \text{PatientBirth),}$
 $\text{JSONdata} \sqsubseteq \text{encrypted.(PatientName} \sqcup \text{PatientBirth).}$

Створюється зашифрований пакет даних (TransferData), в якому знаходиться анонімізоване ЦМЗ та JSON-файл:

$\text{TransferData} \sqsubseteq \text{JSONdata} \sqcup \text{LTimageNoPerson.}$

Це створено для того, щоб у випадку пошкодження чи компрометування одного з файлів персональні дані пацієнта залишаються в безпеці.

Передача ЦМЗ до GRID відбувається шляхом запису поруч з початковим файлом спеціального ключа (GRIDkey), в якому прописаний унікальний ідентифікатор (UID) та дані пацієнта:

$\text{LTimage} \sqcup \text{GRIDkey} \sqsubseteq \text{GRIDImage,}$
 $\text{GRIDkey} \sqsubseteq \text{UID} \sqcup \text{PatientData.}$

Під час анонімізації замість персональних даних в ЦМЗ записується UID:

$\text{GRIDImageNoPerson} \sqsubseteq \text{GRIDImage} \sqcup \text{set.(UID} \sqcup \text{TagID).}$

Запит щодо отримання ЦМЗ здійснюється за механізмом отримання зображення, відповідного GRIDkey.

Передача ЦМЗ у бази знань для наукових потреб полягає в тому, щоб деперсоніфікувати ЦМЗ за спеціально вибраними параметрами (empty.varTagID):

$\text{LTimageNoPerson} \sqsubseteq \text{empty.varTagID}$

Відповідно до Закону про захист персональних даних, медичні дані, що зберігаються поза медичними закладами, мають бути деперсоніфіковані. Завдяки тековій структурі DICOM файлів, є можливість вибірково видалити особисті дані про пацієнта, такі як прізвище,

ім'я, дата народження, і вже анонімними зберігати поза межами закладу охорони здоров'я, де створено файли з персональними медичними даними.

Отже, розроблений метод збереження цифрових медичних зображень містить покроковий опис дій з використанням дескриптивної логіки, що дає змогу формалізувати весь процес зберігання медичної інформації.

Алгоритм забезпечення доступу до медичних даних. Для підтримки використання запропонованого методу розроблено алгоритм забезпечення доступу до медичних даних, який реалізує порядок доступу та передавання цифрових медичних даних між учасниками екосистеми цифрової медицини: пацієнта, сімейного лікаря, лікаря консультанта та фахівця відділення функціональної діагностики та клінічної лабораторії (рис. 3).

Зазначимо основні функції та дії цих користувачів цифрових медичних даних.

1. Пацієнт – знімає свої показники та передає їх лікарю, зв'язується за допомогою мобільного телефону з лікарем і повідомляє свої скарги.

2. Сімейний лікар:

а) отримує від пацієнта дані про його здоров'я (показники);

б) посилає пацієнтові свої рекомендації з лікування або реабілітації;

в) направляє пацієнта (за потреби) на дослідження в клінічну лабораторію та відділення функціональної діагностики за допомогою електронного направлення, після цього корегує свої призначення;

д) посилає дані пацієнта (цифрові зображення, витяг з електронної картки пацієнта) лікарю-консультанту, якщо є необхідність поглибленого дослідження;

ж) за кожним актом взаємодії записує всі отримані дані в електронний медичний документ.

3. Лікар-консультант:

а) аналізує отримані медичні дані (виписка з електронного медичного документу, цифрові зображення);

б) надсилає результати консультації сімейному лікарю.

4. Фахівець відділення функціональної діагностики та клінічної лабораторії :

а) отримує електронне направлення від сімейного лікаря;

б) здійснює відповідне обстеження пацієнта;

в) відсилає результати обстеження сімейному лікарю (як записи у електронний медичний документ).

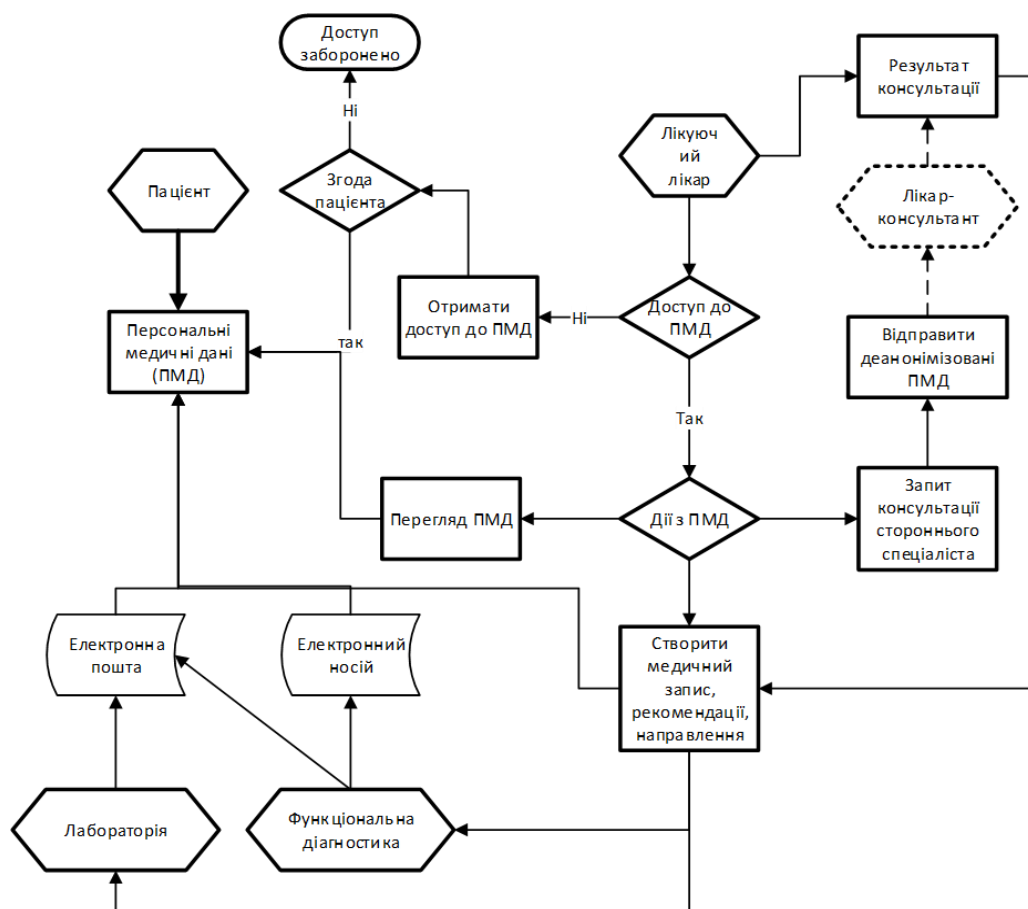


Рис. 3 – Алгоритм забезпечення доступу до медичних даних

Розширення можливостей використання збережених ЦМЗ для подальшого їхнього аналізу. Зазначимо, що більшість ІДС підтримують стандарт DICOM 3.0, але бувають випадки, коли виробник медичного обладнання з різних причин нехтує вимогами до формату зображення, кодування формату метаданих або не підтримує функцію додаткового збереження на DICOM-сервер. Для забезпечення збору файлів зображень від БД діагностичної системи, імпорту метаданих з БД у файли *.dcm, впорядкування тегів відповідно до DICOM 3.0 та узгодження даних цифрових медичних зображень з БД пацієнтів МІС треба додатково здійснювати такі операції: формування внутрішнього списку актуальних файлів ЦМЗ, проведення під час запуску програми перевірки наявності нових файлів з внутрішнім списком (для виключення повторної конвертації оброблених файлів), зміну формату ЦМЗ на стандарт DICOM (за необхідності) і запит до БД пацієнтів для заповнення порожніх тегів.

Якщо в діагностичній системі передбачено формування текстової інформації за допомогою кирилиці, виконується процедура транслітерації метаданих, проводиться необхідна корекція і зміна назви файлу, після чого виконується експорт ЦМЗ в PACS.

Для забезпечення якісного лікування, кращого розуміння стану в динаміці, необхідні анамнези, результати лабораторного та інструментального дослідження (зокрема ЦМЗ), тобто повні медичні дані пацієнта за тривалий період часу. Оскільки ємність необхідного дискового простору в закладах охорони здоров'я обмежена, цифрові медичні зображення на III стадії переносяться на довгострокове зберігання.

Висновки

Використання запропонованого методу збереження цифрових медичних зображень, який ґрунтується на моделях деталізованого подання кожного його етапу, уможливорює підтримку процесу створення та збереження файлу дослідження у різних типах цифрових сховищ, а також забезпечує деперсоніфікацію даних для подальшого використання за межами закладу охорони здоров'я.

Узагальнений алгоритм забезпечення доступу до медичних даних регулює порядок доступу до збережених цифрових медичних даних та реалізує шляхи взаємодії між учасниками екосистеми цифрової медицини: пацієнта, сімейного лікаря, лікаря консультанта та фахівця відділення функціональної діагностики та клінічної лабораторії.

Перелік використаних джерел

- [1] Романюк О., Козак Л., Коваленко О. Формування інтероперабельного інформаційного середовища цифрової медицини: персональні медичні дані. *Science and innovation*. 2021. Т. 17, № 5. С. 50-62. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine17.05.050>.
- [2] Berglund M. E., Duvall J., Dunne L. E. A survey of the historical scope and current trends of wearable technology applications. *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, Heidelberg, Germany, 12-16 September 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2971763.297179>.
- [3] Marques I.C.P., Ferreira J.J.M. Digital transformation in the area of health: systematic review of 45 years of evolution. *Health and Technology*. 2019. Vol. 10, no. 3. Pp. 575-586. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12553-019-00402-8>.
- [4] Cline G. B., Luiz J. M. Information technology systems in public sector health facilities in developing countries: the case of South Africa. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2013. Vol. 13. Article 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/1472-6947-13-13>.
- [5] Boonstra A., Broekhuis M. Barriers to the acceptance of electronic medical records by physicians from systematic review to taxonomy and interventions. *BMC Health Services Research*. 2010. Vol. 10. Article 231. DOI: <https://doi.org/10.1186/1472-6963-10-231>.
- [6] Ben-Assuli O., Leshno M., Shabtai I. Using Electronic Medical Record Systems for Admission Decisions in Emergency Departments: Examining the Crowdedness Effect. *Journal of Medical Systems*. 2012. Vol. 36, no. 6. Pp. 3795-3803. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10916-012-9852-0>.
- [7] Lupton D. Critical perspectives on digital health technologies. *Sociology compass*. 2014. Vol. 8, no. 12. Pp. 1344-1359. DOI: <https://doi.org/10.1111/soc4.12226>.
- [8] Electronic health records. Centers for Medicare & Medicaid Services. URL: <https://www.cms.gov/priorities/key-initiatives/e-health/records> (дата звернення: 15.08.2025).
- [9] Caine K., Hanania R. Patients want granular privacy control over health information in electronic medical records. *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2013. Vol. 20, no. 1. Pp. 7-15. DOI: <https://doi.org/10.1136/amiajnl-2012-001023>.
- [10] Kozak L.M., Kovalenko O.S., Surovtsev I.V. Basic Components of the Software Modules Construction for Obtaining, Storing and Exchanging Medical and Environmental Information. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2023. Vol. 3(213). Pp. 53-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt213.03.053>.
- [11] An overview of the impact of PACS as health informatics and technology e-health in healthcare management / França R.P., Monteiro F.C.B., Arthur R., Iano Yu. *Cognitive Systems and Signal Processing in Image Processing*. Academic Press, 2022. Pp. 101-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824410-4.00007-6>.
- [12] Досвід та перспективи створення медичних інформаційних систем та інформаційних технологій підтримки надання медичної допомоги / Коваленко О.С., Козак Л.М., Наджифіан Туманджані М.,

Романюк О.О. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2022. Vol. 1(207). Pp. 59-73. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.059>.

- [13] Зміни, що вносяться до Концепції розвитку електронної охорони здоров'я: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 6 вересня 2024 р. № 857-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/857-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 25.09.2025).
- [14] Устінов О.В. Як здійснюється захист персональних і медичних даних у системі eHealth.

Український медичний часопис. 2022. URL: <http://www.umj.com.ua/uk/novyna-233223-yak-zdijsnyuyetsya-zaxist-personalnih-i-medichnih-danih-u-sistemi-ehealth> (дата звернення: 10.08.2025).

- [15] Hewitt C. ORGs for scalable, robust, privacy-friendly client cloud computing. *IEEE internet computing*. 2008. Vol. 12, no. 5. Pp. 96-99. DOI: <https://doi.org/10.1109/mic.2008.107>.

METHOD OF SAVING DIGITAL MEDICAL IMAGES FOR FURTHER USE IN THE TREATMENT AND DIAGNOSTIC PROCESS

Kozak L.M.	D.Sc. (Biology), senior researcher, Institute of information technologies and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7412-3041 , e-mail: lmkozak52@gmail.com ;
Romanyuk O.O.	PhD (Engineering), Institute of information technologies and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6865-1403 , e-mail: knsksn7@gmail.com ;
Kovalenko O.S.	D.Sc. (Medical Sciences), professor, Institute of information technologies and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7412-3041 , e-mail: lmkozak52@gmail.com ;
Pezentsali H.O.	PhD (Engineering), senior researcher, Institute of information technologies and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6319-6993 , e-mail: annp.irtc@gmail.com ;
Azarhov O.Yu.	D.Sc. (Medical Sciences), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2085-4786 , e-mail: alexazarhov@gmail.com

Information technologies for processing, analysing, storing and exchanging digital medical data are the basis of digital transformation in the healthcare sector. Currently, the integration of medical information systems (MIS), various electronic resources and multi-level software tools into an integrated ecosystem of digital medicine is relevant. To ensure the effective use of digital medical data, cloud technologies are widely used, which provide access to programs and data with minimal use of infrastructure within a healthcare institution. The aim of the work is to develop a method for storing digital medical images for further use in the medical and diagnostic process, taking into account the peculiarities of internal information exchange processes in a healthcare institution (HCI) and to ensure the need for information interaction between two or more such institutions. Picture Archiving and Communication Systems (PACS) are at the forefront of use in the medical sector as a system focused on reducing costs, increasing productivity and speed of archiving and presenting medical images in electronic format. The proposed method consists of four stages of storing the formed image at different levels of further storage according to the DICOM standard: I stage – in the database of the information and diagnostic system, II stage – in PACS, in a long-term storage repository. To provide quality treatment, to better understand the state in dynamics, historical medical data of the patient over a long period of time is necessary. Since the capacity of the required disk space in healthcare institutions is limited, digital medical images at the III stage are transferred to long-term storage. The last stage ensures data anonymization for further use outside the HCI. The developed method for storing digital medical images contains a step-by-step description of actions using descriptive logic, which allows formalizing the entire process of storing medical information.

Keywords: information technology, digital medicine, storage, digital medical images, cloud technologies, method, model, digital medical data.

References

- [1] O. Romanyuk, L. Kozak, and O. Kovalenko, "Formuvannya interoperabel'noho informatsynoho seredovyshcha tsyvrovoyi medytyny: personal'ni

medychni dani]" ["Formation of an interoperable information environment of digital medicine: personal medical data"], *Science and innovation*, vol. 17, no. 5, pp. 50-62, 2021. doi: [10.15407/scine17.05.050](https://doi.org/10.15407/scine17.05.050). (Ukr.)

- [2] M.E. Berglund, J. Duvall, and L.E. Dunne, "A survey of the historical scope and current trends of wearable technology applications," in *Proc. of the 2016 ACM Int. Symposium on Wearable Computers*, Heidelberg, Germany, Sept. 12-16, 2016. doi: **10.1145/2971763.297179**.
- [3] I.C.P. Marques, and J.J.M. Ferreira, "Digital transformation in the area of health: systematic review of 45 years of evolution," *Health and Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 575-586, 2019. doi: **10.1007/s12553-019-00402-8**.
- [4] G.B. Cline, and G.B. Luiz, "Information technology systems in public sector health facilities in developing countries: the case of South Africa," *BMC Medical Informatics and Decision Making*, vol. 13, article 13, 2013. doi: **10.1186/1472-6947-13-13**.
- [5] A. Boonstra, and M. Broekhuis, "Barriers to the acceptance of electronic medical records by physicians from systematic review to taxonomy and interventions," *BMC Health Services Research*, vol. 10, article 231, 2010. doi: **10.1186/1472-6963-10-231**.
- [6] O. Ben-Assuli, M. Leshno, and I. Shabtai, "Using Electronic Medical Record Systems for Admission Decisions in Emergency Departments: Examining the Crowdedness Effect," *Journal of Medical Systems*, vol. 36, no. 6, pp. 3795-3803, 2012. doi: **10.1007/s10916-012-9852-0**.
- [7] D. Lupton, "Critical perspectives on digital health technologies," *Sociology compass*, vol. 8, no. 12, pp. 1344-1359, 2014. doi: **10.1111/soc4.12226**.
- [8] Electronic health records. Centers for Medicare & Medicaid Services. [Online]. Available: <https://www.cms.gov/priorities/key-initiatives/e-health/records>. Accessed on: August 15, 2025.
- [9] K. Caine, and R. Hanania, "Patients want granular privacy control over health information in electronic medical records," *Journal of the American Medical Informatics Association*, vol. 20, no. 1, pp. 7-15, 2013. doi: **10.1136/amiajnl-2012-001023**.
- [10] L.M. Kozak, O.S. Kovalenko, and I.V. Surovtsev, "Basic Components of the Software Modules Construction for Obtaining, Storing and Exchanging Medical and Environmental Information," *Cybernetics and Computer Engineering*, vol. 3(213), pp. 53-68, 2023. doi: **10.15407/kvt213.03.053**.
- [11] R.P. França, F.C.B. Monteiro, R. Arthur, and Yu. Iano, "An overview of the impact of PACS as health informatics and technology e-health in healthcare management," in *Cognitive Systems and Signal Processing in Image Processing*. Academic Press, 2022, pp. 101-128. doi: **10.1016/B978-0-12-824410-4.00007-6**.
- [12] O.S. Kovalenko, L.M. Kozak, M. Nadzhyfian Tuman-dzhani, and O.O. Romanyuk, "Dosvid ta perspektyvy stvorennia medychnykh informatsiynykh system ta informatsiynykh tekhnolohiy pidtrymky nadannya medychnoyi dopomohy" ["Experience and prospects of creating medical information systems and information technologies to support the provision of medical care"], *Cybernetics and Computer Engineering*, vol. 1(207), pp. 59-73, 2022. doi: **10.15407/kvt207.01.059**. (Ukr.).
- [13] *Zminy, shcho vnosyatsia do Kontseptsii rozvytku elektronnoi okhorony zdorovia* [Changes to the Concept for the Development of Electronic Health Care]. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated September 6, 2024 No. 857-r. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/857-2024-%D1%80#Text>. Accessed on: September 25, 2025. (Ukr.).
- [14] O.V. Ustinov, "Yak zdiysnyuyet'sya zakhyst personal'nykh i medychnykh danykh u systemi eHealth" ["How is personal and medical data protected in the eHealth system"], *Ukrainskyi medychnyi chasopys – Ukrainian Medical Journal*, 2022. [Online]. Available: <http://www.umj.com.ua/uk/novyna-233223-yak-zdiysnyuyetsya-zaxyst-personalnihi-i-medichnihi-danihi-u-sistemi-ehealth>. Accessed on: August 10, 2025. (Ukr.).
- [15] C. Hewitt, "ORGs for scalable, robust, privacy-friendly client cloud computing," *IEEE internet computing*, vol. 12, no. 5, pp. 96-99, 2008. doi: **10.1109/mic.2008.107**.

Стаття надійшла 10.10.2025

Стаття прийнята 21.10.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Метод збереження цифрових медичних зображень для подальшого використання в лікувально-діагностичному процесі / Л. М. Козак та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 208-215. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344911>.

183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 502/504

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344954

ОЦІНКА ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИНЦИПІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Бакуліч О.О. канд. техн. наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5700-0576>, e-mail: bakulich.elena@gmail.com;
Кухтик Н.О. доктор філософії, доцент, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9467-891X>, e-mail: natakuchtik@gmail.com

У статті розглядається синтез понять сталого розвитку та процедури оцінки впливу на довкілля як основних підходів до екологічно відповідального планування. Мета статті полягає в тому, щоб систематизувати теоретичну основу сталого розвитку та визначити, яку роль оцінка впливу на довкілля планованої діяльності відіграє у практичній реалізації цієї концепції. У дослідженні використано методи системного та порівняльного правового аналізу міжнародних стандартів, узагальнення сучасного досвіду впровадження екологічних оцінок. Розкрито триєдину структуру сталого розвитку через економічний, соціальний та екологічний виміри, проаналізовано еволюцію міжнародних ініціатив. Детально досліджено методологію проведення оцінки впливу на довкілля, включаючи етапи попередньої оцінки, визначення сфери оцінки, базових досліджень, прогнозування впливів та розробки заходів з мінімізації ймовірних впливів. Особливу увагу приділено системі індикаторів сталості (вуглецевий слід, водний слід, індекс біорізноманіття), які дозволяють кількісно оцінити внесок проєктів у досягнення Цілей сталого розвитку. Обґрунтовано необхідність забезпечення прозорості процесів та активної громадської участі як основи довіри до інституційних механізмів. Визначено основні виклики сучасної практики, пов'язані з кліматичними змінами, кумулятивними ефектами та трансграничним впливом проєктів. Наукова новизна полягає в комплексному підході до розгляду сталого розвитку та оцінки впливу на довкілля як взаємодоповнюючих концепцій. Практична значущість роботи визначається можливістю використання для екологічно відповідального планування.

Ключові слова: сталий розвиток, оцінка впливу на довкілля, планована діяльність, екологічна безпека, участь громадськості, інноваційні технології.

Постановка проблеми

Посилення антропогенного навантаження на природні екосистеми та обмеженість природних ресурсів зумовлює комплексну проблему для досягнення збалансованого розвитку суспільства. Оскільки традиційні підходи до економічного планування зосереджені виключно на короткострокових економічних показниках, вони неспроможні забезпечити врахування довгострокових екологічних і соціальних наслідків людської діяльності. Реалізація принципів стійкості на практиці одночасно потребує ефективних інструментів для попереднього аналізу та мінімізації негативних впливів від планованої діяльності. Оцінка впливу на довкілля (ОВД) як процедура, яка спрямована на виявлення, аналіз та врахування наслідків планованої діяльності для довкілля, для прийняття рішення про можливість або неможливість впровадження проєктів, має стати основним способом реалізації принципів сталого розвитку в плановій діяльності. Однак поточні методологічні підходи не враховують належним чином усі аспекти сталого розвитку, що призводить до зниження ефективності екологічного планування. Це дослідження є актуальним, оскільки як теоретичне обґрунтування, так і практичний розвиток цілісних підходів до

планування, що розглядаються в даній роботі, сприятимуть справжньому застосуванню принципів сталого розвитку шляхом вдосконалення процедури ОВД.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останні дослідження свідчать про те, що в результаті зростання попиту на сталий розвиток та покращення ресурсів, екологічні питання тепер набувають більшого значення в процесі прийняття рішень [1]. Однак сталий розвиток як орієнтир призвів до незначного переорієнтування екологічної оцінки, законодавства та процедур екологічної оцінки відповідно до сталого розвитку [2]. Деякі науковці відзначають, що процеси оцінки впливу на довкілля навпаки є центральним елементом затвердження проєктів у всьому світі та невід'ємною частиною урядових стратегій сталого розвитку [3]. Еволюція екологічної політики, знань, обізнаності та динаміки ринку поставила під сумнів традиційні підходи, методології та обсягу оцінки впливу. Вони виходять за рамки визначення забруднення води та повітря, серйозного знищення середовищ існування та видів або впливу на популяції та охоплюють ширші цілі, такі як сприяння сталому розвитку та вирішення таких проблем, як здоров'я, зміна клімату та циркулярна

економіка [4]. Проблеми практичної реалізації принципів сталого розвитку в процедурах екологічної оцінки залишаються маловирішеними на рівні теоретичних узагальнень, незважаючи на значні поступу в цьому відношенні. Це стає особливо актуальним щодо сучасних технологічних можливостей серед сучасних глобальних екологічних викликів.

Мета статті

Метою цього дослідження є вивчення основних концепцій сталого розвитку та обґрунтування методу інтеграції екологічної оцінки в систему планування, що служить засобом досягнення балансу між економічними, соціальними та екологічними процесами.

Виклад основного матеріалу

Концепція сталого розвитку, вперше сформульована у доповіді Комісії Брундтланд «Наше спільне майбутнє» (1987), визначає сталий розвиток як розвиток, який задовольняє потреби сучасного покоління, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти свої власні потреби. Ця концепція базується на розумінні взаємозалежності економічних, соціальних та екологічних процесів.

Економічне зростання базується на експлуатації природних ресурсів та пов'язане зі збільшенням споживання енергії. Більше того, споживання енергії та нафти призводить до збільшення забруднення та викидів CO₂. В епоху глобалізації викиди переносяться до країн-виробників, що спричиняє поглиблення глобальної нерівності. Це вимагає переходу від лінійної моделі «видобуток → виробництво → споживання → відходи» до циркулярної економіки, що мінімізує відходи та максимізує повторне використання ресурсів [5].

Просування соціального прогресу забезпечується через розширення доступу до продуктів харчування, соціального захисту, освіти, охорони здоров'я, житла, цифрових технологій та інших товарів і послуг першої необхідності. Особлива увага приділяється подоланню бідності, зменшенню нерівності та забезпеченню інклюзивного розвитку [6].

Екологічний аспект сталого розвитку зосереджений на захисті та збереженні природних ресурсів та екосистем для нинішнього та майбутніх поколінь шляхом сприяння таким практикам, як використання відновлюваної енергії, зменшення відходів, збереження води та захист біорізноманіття. Провідні види діяльності включають скорочення шкідливих викидів та забруднення, впровадження сталого сільського господарства та управління відходами, а також захист екосистем та природних середовищ існування. Основний акцент – раціональне використання відновлюваних ресурсів у межах їх регенеративної здатності та мінімізація використання невідновлюваних ресурсів [7].

У 1992 році в Ріо-де-Жанейро відбулася Конференція ООН з навколишнього середовища та розвитку, на якій були прийняті Декларація Ріо та Порядок денний

на XXI століття. Саме тут вперше були сформульовані принципи сталого розвитку: спільна, але диференційована відповідальність; попередження; компенсація екологічних збитків [8].

Подальший розвиток концепції відбувся через прийняття Цілей сталого розвитку (ЦСР) тисячоліття (2000) та їх трансформацію в Цілі сталого розвитку (2015). Сімнадцять ЦСР охоплюють широкий спектр взаємопов'язаних завдань від подолання бідності до захисту клімату.

Окремі положення Конституції України, що стосуються екології, раціонального використання природних ресурсів та соціально-економічного розвитку, можна розглядати як напрямки реалізації принципів сталого розвитку. Правові принципи сталого розвитку здебільшого втілені в законах, стратегічних документах та міжнародних угодах, до яких приєдналася Україна.

Одним із основних механізмів практичної реалізації цих принципів у сфері охорони навколишнього середовища є застосування оцінки впливу на довкілля (ОВД). ОВД є процедурним інструментом, що забезпечує врахування екологічних факторів на етапі планування проєктів, який базується на принципах превентивності, комплексності, прозорості та участі громадськості.

Принципи проведення оцінки впливу на навколишнє середовище передбачають низку послідовних етапів, кожен з яких характеризується окремими завданнями та методологічними аспектами. На загальний успіх процесу істотно впливає якість кожного етапу і логічні зв'язки між ними [9].

Скринінг – це перший етап процесу ОВД, результатом якого є ключове рішення, а саме: проводити оцінку (на основі ймовірного значного впливу) або не проводити її (за очікуваної відсутності такого впливу). Ключовий внесок скринінгу в якість ОВД:

- сприяє прийняттю обґрунтованих рішень, надаючи чіткий, добре структурований, фактичний аналіз впливу та наслідків запропонованих дій;

- впливає як на вибір проєктів, так і на розробку політики, відсіюючи екологічно та/або соціально необґрунтовані пропозиції, а також змінюючи можливі дії.

Важливим аспектом проведення ОВД є визначення рівня впливу планованої діяльності. Коли розглядаються проєкти, особливо ті, що стосуються природних ресурсів, таких як видобуток корисних копалин, гідроелектростанції, ми можемо з упевненістю сказати, що вони вимагатимуть оцінки впливу на довкілля та соціальну сферу [10].

За допомогою критеріїв скринінгу оцінюють, чи є очікуваний вплив планованої діяльності на навколишнє середовище достатньо суттєвим, щоб вимагати комплексної ОВД. Ці критерії враховують різні аспекти проєкту, включаючи його тип, розмір, технологію та розташування, а також особливості навколишнього середовища, такі як його чутливість, біорізноманіття та існуючі охоронні території. Таким чином оцінюють і

потенційний характер та ступінь впливу, який охоплює прямі, непрямі, кумулятивні, транскордонні впливи. Визначення того, чи може планована діяльність призвести до значного впливу на довкілля та визначення подальших кроків в ОВД, можливе тільки після скрінінгу [11].

Етап визначення обсягу досліджень слугує основою для якісної ОВД через визначення екологічних і соціально-економічних елементів, які потребують ретельного вивчення. Ця фаза має важливе значення для спрямування уваги на найбільш значні потенційні наслідки, одночасно запобігаючи перевантаженню деталями щодо менш критичних аспектів. Цей крок включає оцінку та визначення обсягу інформації та аналізу, які знадобляться органам влади, і тому забезпечує вищий рівень визначеності для розробника на ранній стадії процесу ОВД. Іншими словами, визначення обсягу досліджень визначає зміст звіту про ОВД та гарантує, що оцінка впливу на навколишнє середовище зосереджена на найбільш значних впливах проекту на фактори довкілля [12].

Найважливішим документом у всьому процесі ОВД є звіт про оцінку впливу на довкілля планованої діяльності. Звіт з ОВД має містити достатньо інформації, щоб дозволити компетентному органу прийняти обґрунтоване рішення щодо можливості або неможливості здійснення планованої діяльності у визначеній території, враховуючи всі її унікальні характеристики [13].

Ефективна реалізація принципів сталого розвитку неможлива без активної участі громадськості в процесах планування та прийняття рішень. Громадські слухання з питань ОВД є обов'язковою процедурою, що забезпечує врахування пропозицій та зауважень зацікавлених сторін.

Участь громадськості в процесах ОВД загалом вважається однією з головних гарантій забезпечення доступу до інформації та демократизації процесів прийняття рішень щодо екологічних питань, але її впровадження є нерівномірним. Учасники шукають зовнішніх каналів впливу на рішення, враховуючи проблеми з існуючими формальними процесами, такими як публічні слухання. Хоча принципи громадської участі закріплені законодавчо, практичне застосування часто стикається зі значними проблемами. Дослідження досвіду різних країн виявило системні проблеми, які перешкоджають ефективності участі громадськості в процедурах ОВД. Зберігаються критичні перешкоди для ефективної участі громадськості через відсутність каналів участі та обмежений доступ до інформації, пов'язаної з проектом. Крім того, дефіцит прозорих і відповідних процедур вирішення соціальних наслідків сприяє розвитку пасивного ставлення серед населення та призводить до зниження довіри до інституційних рамок, що регулюють питання довкілля. [14].

На спроможність і бажання різних суспільних груп брати участь у екологічній оцінці значною мірою впливають соціально-економічні фактори. Політичний

вплив, недостатні людські ресурси, різний рівень освіти та інформаційної грамотності сприяють створенню нерівних можливостей для участі різних верств населення [15].

Проведений аналіз свідчить, що ОВД є ключовим механізмом практичної реалізації принципів сталого розвитку. Інтеграція трьох вимірів сталості: економічного, соціального та екологічного в процедуру ОВД дозволяє забезпечити комплексний підхід до планування розвитку (рис. 1).



Рис. 1 – Концептуальна модель інтеграції сталого розвитку та ОВД

Для підвищення ефективності екологічного планування важливо методично впроваджувати принципи сталого розвитку на всіх етапах процесу ОВД. Розширення масштабів оцінки вимагає аналізу не лише прямого впливу на навколишнє середовище, а й соціально-економічних наслідків проекту. Це передбачає оцінку впливу на місцеві громади, трудові ресурси, соціальну інфраструктуру та економічне зростання регіону. Застосовуючи інтегрований підхід, можна виявити синергійні ефекти та можливі конфлікти між різними аспектами стійкості.

Для посилення участі громадськості важливо перетворити громадські слухання з формального процесу на активне залучення всіх зацікавлених сторін на етапі планування. На практиці це означає проведення консультацій з місцевими громадами, громадськими організаціями та суб'єктами господарювання на початковому етапі концептуального планування проекту.

Створення довгострокової системи моніторингу передбачає розробку основи для відстеження екологічних, соціальних та економічних показників протягом усього проекту. Такий підхід сприятиме оперативному виявленню несприятливих тенденцій та дозволить модифікувати стратегії пом'якшення.

Включення показників стійкості в процес ОВД дасть змогу кількісно оцінити, як проєкт сприяє досягненню Цілей сталого розвитку. Інтеграція показників стійкості в процес ОВД вимагає впровадження систематичного методу кількісної оцінки екологічних, соціальних та економічних аспектів планованої діяльності та ґрунтується на міжнародних стандартах і визнаних наукових методологіях.

Прикладом індикаторів екологічної стійкості є вуглецевий слід проєкту, який характеризується як кумулятивний загальний обсяг викидів парникових газів, представлений у тоннах CO₂-еквівалента, вироблених протягом усього життєвого циклу проєкту. Методологія цього розрахунку відповідає стандарту ISO 14067 [16] і Протоколу про викиди парникових газів [17], що передбачає перевірку прямих викидів із джерел, що знаходяться у власності, непрямих викидів у результаті споживання енергії та додаткових непрямих викидів, що відбуваються в ланцюгу постачання.

Загальне споживання водних ресурсів, виражене в кубічних метрах на одиницю продукту або послуги, визначається водним слідом. Як зазначено в методології, встановленій Hoeskstra та ін., цей відбиток складається з трьох компонентів: блакитний компонент, який стосується споживання поверхневих і підземних вод; зелений компонент, що відображає використання дощової води; і сірий компонент, який представляє об'єм води, необхідний для розбавлення забруднюючих речовин до прийняттого рівня [18].

Індекс біорізноманіття оцінюється за допомогою індикаторів видового багатства, індексу Шеннона для вимірювання різноманітності та індексу Сімпсона для оцінки домінування видів. Ця методологія охоплює польові біологічні дослідження, аналіз якості середовища існування та використання моделей, розроблених для прогнозування втрати біорізноманіття [19].

Індикатори соціального впливу Індекс соціального впливу є всеохоплюючим показником, який охоплює вплив проєкту на зайнятість населення, рівень доходу, стан здоров'я та доступ до освітніх послуг. Його методологічною основою є оцінка соціального життєвого циклу (S-LCA) відповідно, що передбачає проведення соціологічних опитувань та аналіз статистичних даних [20].

Участь громадськості оцінюється за допомогою кількісних показників, пов'язаних із залученням зацікавлених сторін, які включають загальну кількість учасників консультацій, частку пропозицій, розглянутих у остаточних рішеннях, і індекс задоволеності процесом участі, виміряний за 100-бальною шкалою. Також включено показники економічної стійкості [21].

Економічна оцінка екосистемних послуг виражається в грошовому еквіваленті шляхом застосування методів ринкової оцінки, витратного підходу та методу умовної оцінки. Ця структура полегшує кількісну оцінку економічної значущості природних функцій, які можуть постраждати або підтримуватися завдяки проєкту. Співвідношення витрат і вигод визначається

шляхом порівняння чистої теперішньої вартості загальних вигод із чистою теперішньою вартістю загальних витрат, яка охоплює зовнішні екологічні та соціальні наслідки, дисконтовані до базового року. Інтегральні показники стійкості. Включення принципів циклічної економіки в оцінку проєктів допоможе зменшити відходи та підвищити повторне використання ресурсів. Для цього необхідно оцінювати потенціал використання найбільш ефективних технологій та інноваційних підходів [22].

Індекс стійкості проєкту формулюється як зважена сукупність нормалізованих показників, що стосуються екологічних, соціальних та економічних аспектів. Цей індекс виходить з інтеграції трьох основних компонентів: екологічного, соціального та економічного, кожен з яких попередньо нормалізовано для полегшення порівняльності. Кожному компоненту призначається відповідний ваговий коефіцієнт, який відображає пріоритети, пов'язані зі сталим розвитком у конкретному контексті проєкту. Екологічний компонент оцінює екологічний вплив, соціальний компонент розглядає соціальні наслідки, а економічний компонент оцінює економічну ефективність. Отриманий індекс стійкості проєкту являє собою зважену суму цих трьох компонентів із ваговими коефіцієнтами, встановленими на основі унікальних характеристик і пріоритетів окремого проєкту. Використання цієї системи показників забезпечує міцну основу для об'єктивного порівняння різних варіантів впровадження проєктів і визначення рішень, які найбільше відповідають принципам сталого розвитку

Висновки

Сталий розвиток та оцінка впливу на довкілля є взаємодоповнюючими концепціями, які забезпечують збалансований підхід до планування людської діяльності. Інтеграція принципів сталості в процедури ОВД дозволяє враховувати довгострокові екологічні та соціальні наслідки проєктів на етапі їх планування.

Ефективна реалізація цього підходу потребує постійного удосконалення методологій ОВД, використання інноваційних технологій та забезпечення високого рівня прозорості процесів. Особливого значення набуває розвиток компетентностей фахівців та підвищення екологічної свідомості суспільства.

Майбутній розвиток сталого планування пов'язаний з необхідністю адаптації до кліматичних змін, врахування кумулятивних ефектів та забезпечення міжнародної координації. Оцінка впливу на довкілля має еволюціонувати як гнучкий інструмент, здатний відповідати на нові виклики та можливості.

Прийнявши ці стратегії, стане можливим змінити оцінку впливу на довкілля із простого засобу зменшення навантаження для навколишнього середовища на інструмент, який сприятиме сталому розвитку, враховуючи потреби як теперішнього, так і майбутніх поколінь.

Практичне впровадження результатів дослідження може сприяти розробці методичних рекомендацій для різних секторів економіки та підвищенню якості екологічного планування в Україні.

Перелік використаних джерел

- [1] Olukolajo M. A., Oyetunji A. K., Amaechi C. V. A Scientometric Review of Environmental Valuation Research with an Altmetric Pathway for the Future. *Environments*. 2023. Vol. 10(4). Article 58. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments10040058>.
- [2] Abalasei M. E., Fighir D., Teodosiu C. Evolution of the Environmental Impact Assessment Process in Romania in the Context of Sustainable Development. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(7). Article 3777. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15073777>.
- [3] Reynolds A. Conservation after the fact: The prevalence of post-approval condition-setting in environmental impact assessment processes in Australia and its implications for achieving ecologically sustainable development outcomes. *Environmental Impact Assessment Review*. 2023. Vol. 99. Article 107032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107032>.
- [4] Pinheiro M. D. Environmental Impact Assessment – Exploring New Frontiers. *Environments*. 2025. Vol. 12(1). Article 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments12010008>.
- [5] Lubacha J. The economic dimension of sustainable development. *Organizing Sustainable Development*. 2023. Pp. 33-45. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003379409-5>.
- [6] UN DESA Policy Brief No. 179: From the First to the Second World Summit for Social Development: reclaiming a broad vision of social progress. URL: <https://desapublications.un.org/policy-briefs/un-desapolicy-brief-no-179-first-second-world-summit-social-development-reclaiming> (дата звернення: 10.07.2025).
- [7] Combs S. Environmental Aspects of sustainability. URL: <https://emeraldcoventions.com/2024/05/environmental-sustainability/> (дата звернення: 01.09.2025).
- [8] 14 червня 1992 року в Ріо-де-Жанейро було прийнято Декларацію з навколишнього середовища та розвитку (Ріо-де-Жанейро, Бразилія). URL: <https://www.npptovtry.org.ua/14-cherwnya-1992-roku-v-rio-de-zhanejro-bulo-pryjnyato-deklaratsiyu-z-navkolyshnogo-seredovyshha-ta-rozvytku-rio-de-zhanejro-brazyliya/> (дата звернення: 08.09.2025).
- [9] Лопушанська М. Що потрібно знати про ОВД: особливості проведення екологічної оцінки. URL: <https://ukraine-oss.com/shho-potribno-znaty-pro-ovd-osoblyvosti-provedennya-ekologichnoyi-ocinky/> (дата звернення: 10.09.2025).
- [10] The 7 Steps to an EIA. Learn - Step 1: Screening. URL: <https://www.iisd.org/learning/eia/eia-7-steps/step-1-screening/> (дата звернення: 10.09.2025).
- [11] Environmental Impact Assessment. URL: <https://bbnj-mgr.fas.harvard.edu/eias> (дата звернення: 07.08.2025).
- [12] The process of an EIA. Steps of the EIA procedure – Scoping. URL: https://www.era-comm.eu/EU_Legislation_on_Environmental_Assessments/part_2/part_2_6.html (дата звернення: 07.08.2025).
- [13] The process of an EIA. Steps of the EIA procedure - Environmental report. URL: https://www.era-comm.eu/EU_Legislation_on_Environmental_Assessments/part_2/part_2_7.html (дата звернення: 07.08.2025).
- [14] Bigolin Neto P., Mallett A. Public participation in environmental impact assessment processes through various channels – Can you listen to us now? Lessons from a Brazilian mining case. *The Extractive Industries and Society*. 2023. Vol. 13. Article 101186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101186>.
- [15] Ye K., Liang Y., Shi J. Evaluation and classification of public participation in EIA for transportation infrastructure megaprojects in China. *Environmental Impact Assessment Review*. 2023. Vol. 101. Article 107138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107138>.
- [16] ISO 14067:2018. Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 46 p.
- [17] The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised ed. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2004. 112 p.
- [18] The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. Water Footprint Network / Hoekstra A. Y., Chapagain A. K., Aldaya M. M., Mekonnen M. M. 2011. 203 p.
- [19] Barroso Seano P., Gortázar C. New insights into biodiversity-disease relationships: the importance of the host community network characterization. *European Journal of Wildlife Research*. 2024. Vol. 70. Article 01799. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10344-024-01799-y>.
- [20] Social Life Cycle Assessment Methodology to Capture «More-Good» and «Less-Bad» Social Impacts – Part 1: A Methodological Framework / P. Dunuwila et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Article 4830. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17114830>.
- [21] Rodgers A. Stakeholder Engagement Assessment Matrix: Problems and Alternatives. URL: <https://simplystakeholders.com/stakeholder-engagement-assessment-matrix/> (дата звернення: 14.08.2025).
- [22] Economic values for ecosystem services: A global synthesis and way forward / L. M. Brander et al. *Ecosystem Services*. 2024. Vol. 66. Article 101606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101606>.

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT AS A TOOL FOR IMPLEMENTING THE PRINCIPLES OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Bakulich O.O. PhD (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5700-0576>, e-mail: bakulich.elena@gmail.com;

Kukhtyk N.O. doctor of philosophy, associate professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9467-891X>, e-mail: natakuchtik@gmail.com

The article considers the synthesis of the concepts of sustainable development and environmental impact assessment procedures as the main approaches to environmentally responsible planning. The purpose of the article is to systematize the theoretical basis of sustainable development and determine the role that environmental impact assessment of planned activities plays in the practical implementation of this concept. The study uses methods of systematic and comparative legal analysis of international standards and summarizes current experience in the implementation of environmental assessments. It reveals the three-part structure of sustainable development through economic, social, and environmental dimensions and analyzes the evolution of international initiatives. The methodology for conducting environmental impact assessments is examined in detail, including the stages of preliminary assessment, determination of the scope of assessment, basic research, impact forecasting, and development of measures to minimize potential impacts. Particular attention is paid to the system of sustainability indicators (carbon footprint, water footprint, biodiversity index), which allow for a quantitative assessment of the contribution of projects to the achievement of the Sustainable Development Goals. The need to ensure transparency of processes and active public participation as the basis for trust in institutional mechanisms is justified. The main challenges of current practice related to climate change, cumulative effects, and the transboundary impact of projects are identified. The scientific novelty lies in a comprehensive approach to considering sustainable development and environmental impact assessment as complementary concepts. The practical significance of the work is determined by its potential use for environmentally responsible planning.

Keywords: sustainable development, environmental impact assessment, planned activities, environmental safety, public participation, innovative technologies.

References

- [1] M.A. Olukolajo, A.K. Oyetunji, and C.V. Amaechi, "Scientometric Review of Environmental Valuation Research with an Altmetric Pathway for the Future," *Environments*, vol. 10(4), article 58, 2023. doi: [10.3390/environments10040058](https://doi.org/10.3390/environments10040058).
- [2] M.E. Abalasei, D. Fighir, and C. Teodosiu, "Evolution of the Environmental Impact Assessment Process in Romania in the Context of Sustainable Development," *Applied Sciences*, vol. 15(7), article 3777, 2025. doi: [10.3390/app15073777](https://doi.org/10.3390/app15073777).
- [3] A. Reynolds, "Conservation after the fact: The prevalence of post-approval condition-setting in environmental impact assessment processes in Australia and its implications for achieving ecologically sustainable development outcomes," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 99, article 107032, 2023. doi: [10.1016/j.eiar.2022.107032](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107032).
- [4] M.D. Pinheiro, "Environmental Impact Assessment – Exploring New Frontiers," *Environments*, vol. 12(1), article 8, 2025. doi: [10.3390/environments12010008](https://doi.org/10.3390/environments12010008).
- [5] J. Lubacha, "The economic dimension of sustainable development," in *Organizing Sustainable Development*, 2023, pp. 33-45. doi: [10.4324/9781003379409-5](https://doi.org/10.4324/9781003379409-5).
- [6] UN DESA Policy Brief No. 179: From the First to the Second World Summit for Social Development: reclaiming a broad vision of social progress. [Online]. Available: <https://desapublications.un.org/policy-briefs/un-desa-policy-brief-no-179-first-second-world-summit-social-development-reclaiming>. Accessed on: July 10, 2025.
- [7] S. Combs, Environmental Aspects of sustainability. [Online]. Available: <https://emeraldcoventions.com/2024/05/environmental-sustainability/>. Accessed on: September 1, 2025.
- [8] 14 chervnia 1992 roku v Rio-de-Zhaneiro bulo pryiniato Deklaratsiiu z navkolyshnoho seredovyscha ta rozvytku (Rio-de-Zhaneiro, Brazylia) (The Rio Declaration on Environment and Development was adopted on 14 June 1992 in Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, Brazil)). [Online]. Available: <https://www.npptovtry.org.ua/14-chervnya-1992-roku-v-rio-de-zhaneiro-bulo-pryinyato-deklaratsiyu-z-navkolyshnoho-seredovyscha-ta-rozvytku-rio-de-zhaneiro-brazylia/>. Accessed on: September 8, 2025. (Ukr.)
- [9] M. Lopushanska, Shcho potribno znaty pro OVD: osoblyvosti provedennia ekolohichnoi otsinky (What you need to know about EIA: features of conducting an environmental assessment). [Online]. Available: <https://ukraine-oss.com/shho-potribno-znaty-pro-ovd-osoblyvosti-provedennya-ekologichnoyi-ocinky/>. Accessed on: September 10, 2025. (Ukr.)
- [10] The 7 Steps to an EIA. Learn - Step 1: Screening. [Online]. Available: <https://www.iisd.org/learning/eia/eia-7-steps/step-1-screening/>. Accessed on: September 10, 2025.

- [11] Environmental Impact Assessment. [Online]. Available: <https://bbnj-mgr.fas.harvard.edu/eias>. Accessed on: August 07, 2025.
- [12] The process of an EIA. Steps of the EIA procedure – Scoping. [Online]. Available: https://www.era-comm.eu/EU_Legislation_on_Environmental_Assessments/part_2/part_2_6.html. Accessed on: August 07, 2025.
- [13] The process of an EIA. Steps of the EIA procedure – Environmental report. [Online]. Available: https://www.era-comm.eu/EU_Legislation_on_Environmental_Assessments/part_2/part_2_7.html. Accessed on: August 07, 2025.
- [14] P. Bigolin Neto, and A. Mallett, “Public participation in environmental impact assessment processes through various channels – Can you listen to us now? Lessons from a Brazilian mining case,” *The Extractive Industries and Society*, vol. 13, article 101186, 2023. doi: **10.1016/j.exis.2022.101186**.
- [15] K. Ye, Y. Liang, and J. Shi, “Evaluation and classification of public participation in EIA for transportation infrastructure megaprojects in China,” *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 101, article 107138, 2023. doi: **10.1016/j.eiar.2023.107138**.
- [16] *Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*, ISO 14067:2018, International Organization for Standardization, Geneva, 2018.
- [17] *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*, revised ed., World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2004.
- [18] A.Y. Hoekstra, A.K. Chapagain, M.M. Aldaya, and M.M. Mekonnen, *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Water Footprint Network, 2011.
- [19] P. Barroso Seano, and C. Gortázar, «New insights into biodiversity-disease relationships: the importance of the host community network characterization», *European Journal of Wildlife Research*, vol. 70, article 01799, 2024. doi: **10.1007/s10344-024-01799-y**.
- [20] P. Dunuwila et al., “Social Life Cycle Assessment Methodology to Capture «More-Good» and «Less-Bad» Social Impacts – Part 1: A Methodological Framework,” *Sustainability*, vol. 17, article 4830, 2025. doi: **10.3390/su17114830**.
- [21] A. Rodgers, “Stakeholder Engagement Assessment Matrix: Problems and Alternatives”. [Online]. Available: <https://simplystakeholders.com/stakeholder-engagement-assessment-matrix/>. Accessed on: August 14, 2025.
- [22] L.M. Brander et al., “Economic values for ecosystem services: A global synthesis and way forward,” *Ecosystem Services*, vol. 66, article 101606, 2024. doi: **10.1016/j.ecoser.2024.101606**.

Стаття надійшла 16.09.2025

Стаття прийнята 07.10.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Бакуліч О. О., Кухтик Н. О. Оцінка впливу на довкілля як інструмент реалізації принципів сталого розвитку. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 216-222. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344954>.

ОСОБЛИВОСТІ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ
ВИРОБНИЦТВА ХЛІБА

Волошин В.С.

д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: vsylshn52@gmail.com;

Бурко В.А.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu

В роботі розглянуті дослідження, що стосуються мінімізації відходів у традиційних промислових технологіях виробництва хліба. Показано, що при відносно невеликій кількості органічних відходів, що легко утилізуються в післявиробничий період, існує доки непереборна кількість енергетичних відходів, які досягають великих розмірів та відносяться до світових об'ємів виробництва цієї важливої для людини продукції. Незважаючи на певні сучасні технології та темпи виробництва хліба, питання промислових відходів існує і не вирішується. В статті запропоновано результати дослідження теоретично обґрунтованого мінімуму відходів загального типу щодо технології виробництва хліба, розроблено методіку, що дозволяє використовувати принцип термодинамічної двоєдності, як механізм, що відповідає за утворення відходів у технологічному процесі, та як основний, що дозволяє мінімізувати утворення відходів в межах самого технологічного процесу. Показано межі, які існують в досягненні бажаного результату, розподіл мінімально можливих відходів між етапами технологічного процесу, та рекомендовано використовувати модифіковану енергію зовнішнього впливу, як спроможну переробити ту частину сировини, яка в певних умовах здатна потрапити у відхід, але за допомогою нової енергії здатна до деяких інших якостей, що роблять з неї корисний продукт в межах самого технологічного процесу. Показано, як можна використати резонансні джерела енергії для досягнення цілі – максимально мінімізувати енергетичні втрати в технологічному процесі виробництва хліба. Посилаючись на теоретично обґрунтований мінімум утворення відходів, запропонований метод введення модифікованої енергії резонансних коливань в технологічний процес дозволяє не тільки на порядок знизити втрати теплової енергії, але й за рахунок резонансних взаємодій з молекулами сировинної води знизити втрати органічних відходів до максимально можливих 3% від сировини, що використовується в технології.

Ключові слова: промислові відходи, виробництво хліба, термодинамічна двоєдність, мінімальне відходоутворення, енергетичні відходи, резонанс.

Постановка проблеми

Сучасні технології виробництва хлібної продукції, незважаючи на високий рівень технологічності, не змогли позбавитися від певної кількості органічних та енергетичних відходів. Причина цього бачиться в слабкості теоретичної бази, що пояснює причини та механізми створення відходів в цьому технологічному процесі. У такому сенсі принцип термодинамічної двоєдності та методика розрахунку теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів в межах технологічного процесу, що базується на ньому, здатні вирішити проблему визначення можливостей тієї чи іншої технології, знайти шляхи і засоби мінімізації відходів всередині технологічного процесу, тим самим мінімізувавши їх появу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основи сучасних технологій отримання хліба сягають корінням в минулі тисячоліття, зародившись разом з технологіями землеробства. Досвід виробництва хліба з найбільш можливими модифікаціями зберігся і до наших днів, практично не змінюючи своїх основних етапів [1, 2], а саме:

- заміс і гідратація борошна з утворенням тіста;

- ферментація, що супроводжується виділенням CO_2 і поризацією замісу;
- порційне формування з подальшим вистоюванням;
- випічка хліба, під час якої відбувається кристалізація крохмалю і утворення поверхневої скоринки;
- охолодження готового хліба для подальшого транспортування та вживання.

Основні фізичні та фізико-хімічні процеси, що відбуваються при виробництві хліба [3]:

- гідратація з набуттям якості клейковини з білкової частини (глютеніну і гліадину) в замісі тіста для утримання бульбашок газу;
- ферментація (анаеробне бродіння) з переробкою борошняного цукру в CO_2 та $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – етанолу;
- термічні зміни з клейстеризацією крохмалю;
- реакція Майяра що супроводжує випічку.

Як і будь-який технологічний процес, виробництво хліба супроводжується появою промислових відходів, які мають органічний характер і, справедливості заради, в більшості своїй потім переробляються, утилізуються і майже не губляться. Однак основними відходами в цих технологіях є втрати енергії, пов'язані з термічним нагріванням і технологічним охолодженням продуктів. Якщо органічні відходи утилізуються після його утворення в технологічному процесі на 40-80%

при відносно невеликій їх кількості, то втрати тепла при промисловому виробництві хліба в світі до 300 млн тонн на рік (дані Продовольчої і сільськогосподарської організації ООН (ФАО)), можуть досягати відчутних розмірів, приблизно $2,5 \cdot 10^9$ МДж/рік. Такі втрати практично нікуди не утилізуються і є певною проблемою для цього надзвичайно важливого технологічного процесу.

Цією особливістю технологія виробництва хліба цікава з точки зору унікальної властивості термодинамічної двоєдності [4] та методів подолання створення відходів із досягненням мінімально можливого відходу утворення в межах самого технологічного процесу. Заради зміни суттєвості частини компонентів вихідної сировини, що складають майбутні відходи J_w , у відповідності до методики [5], до системи слід ввести додаткову енергію E_w потрібної якості чи змінити вигляд базової енергії до потрібного якісного стану E_0^w .

Мета статті

Вказати на засоби щодо мінімізації виникнення відходів у самому технологічному процесі як альтернативи досвіду їх створення та наступної переробки, утилізації тощо.

Виклад основного матеріалу

Основні сировинні компонент у вигляді $(J_0 + J_w)$, де J_0 – частина матеріального потоку сировини, з якої створюється товарна продукція сучасного

технологічного процесу виробництва хліба і їх зміст в сировинній складовій (представлені в таблиці 1). Тут же представлені основні параметри, необхідні для вивчення особливостей термодинамічного стану виробничої системи, основи яких викладені у вигляді наведеної нижче методики дослідження.

Приймаючи до уваги всі ключові етапи процесу, тепловий баланс у хлібопекарній технології можна виразити наступним чином: $E_0 = A_0 + \Delta U + \Delta Q_w$, де E_0 – зовнішня енергія, що надається у технологічний процес (кДж/кг сировини), A_0 – корисна робота, що створюється при виробництві хліба (кДж/кг сировини), ΔU – зміна внутрішньої енергії технологічного процесу (кДж/кг сировини), ΔQ_w – безповоротні втрати енергії (кДж/кг сировини).

Корисна робота A_0 відображає зміни, які відбуваються в кінцевому продукті і можуть бути виміряні. Вона включає в себе роботу, витрачену на підвищення температури тіста, зміну його структури (трансформації клейковини і газів), а також на зміну фізичних і хімічних властивостей хліба в процесі випічки [2].

Внутрішня енергія ΔU технологічного процесу складається з енергії, завдяки якій стаються екзотермічні фізико-хімічні зміни: утворення клейковини, термічні процеси перетворення крохмалю, реакцію Майяра, утворення скоринки, тепловий ефект реакції бродіння. Ця енергія також витрачається на зміну температури і стану тіста, випаровування води та інші хімічні реакції, що відбуваються в процесі випічки [2].

Таблиця 1

Опосередковані аналітичні дані для дослідження процесів утворення відходів при різних способах виробництва хліба

№№ п/п	Параметр	Значення параметру	
Структура вихідної сировини ($J_0 + J_w$) (% від сумарного)			
1	Борошно пшеничне	60	
2	Вода	35	
3	Дріжджі	1÷2	
4	Сіль	1÷1,5	
5	Цукор, жири, молочні продукти, штучні розпушувачі та ін.	до 3,0	
	РАЗОМ:	100	
Відходи (J_w) (кг/тону сировини)			
	Назва Відходу	Кількість, кг/т вихідної сировини	Енергетична цінність втрат, кДж/кг вих. сировини
	Борошно, що не використано в технологічному процесі	50÷100	120
	Борошняний пил	5÷ 10	80÷90
	Залишки води з тіста (випарювання)	20÷ 30	330
	Хімічні добавки, зокрема, дріжджі	15÷20	50 ÷ 120
	Тісто, яке не підійшло для випічки (брак)	50÷ 80	150-220
	Підсушений і зіпсований хліб	85÷ 150	120÷ 280
	Відходи упаковки (пластик, картон))	30÷ 50	-
	РАЗОМ:	225-390	-
	Сумарні енергетичні втрати:	-	850-1160

Продовження таблиці 1

Енергетичні витрати (кДж на 1 кг сировини)		
	Зовнішня вхідна енергія (E_0), включаючи:	2000-2310
	-енергію, що витрачається на ферментацію та на нагрівання тіста в процесі замісу –	20÷30
	-енергію, що необхідна для замісу тіста –	50÷100
	-енергію, що необхідна для нагрівання тіста –	100÷150
	-енергію, що витрачається на випарювання води –	500÷600
	-енергію для адсорбції води крохмалем –	80÷100
	-енергію необхідну на створення клейковини –	50÷70
	-енергію, що втрачається у вигляді відходу –	10÷20
	Корисна робота щодо зміни сировини до кінцевого продукту (A_0)	850-1160
	Зміна внутрішньої енергії в системі (ΔU)	~500
	Зміна внутрішньої енергії в системі (ΔU)	~650
Енергетичні втрати (ΔQ_w) (кДж на 1 кг сировини)		
	Теплові втрати на етапах:	
	- приготування тіста і заміс –	70-80
	- ферментації (бродиння) –	80-100
	- формування тіста –	50-60
	- випічки –	470-670
	- охолодження хліба –	180-250
	РАЗОМ:	850-1160

При наданні в систему додаткової енергії E_w ми не приймаємо до уваги, що внутрішня енергія системи при цьому також змінюється, тобто залишаємо $\Delta U = const$ и запишемо, що $E_0 + E_w \geq \Delta U + (A_0 + A_w)$. Але тут параметр A_w вже означає роботу, що виконана для того, щоб перевести матеріальний потік J_w , з якого раніше отримували відхід, в максимально можливий товарний стан, тобто в певну корисну продукцію.

Узгоджений феноменологічний показник λ у рівнянні Л. Онсагера загального виду $\frac{\Delta S}{E_0} = \frac{J_0 X_0 + J_w X_w}{E_0} \lambda (1 - \lambda)$ запишемо у вигляді $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$. Враховуючи принцип взаємності Онсагера для системи в стані, близькому до термодинамічної рівноважності у відносності частин сировини J_0 і J_w , а також встановлене відношення $A_w/A_0 \approx 0,62$, показник λ представимо, як

$$\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w} = \frac{A_0/J_0}{A_0/J_0 + A_w/J_w} = \frac{J_w}{(0,62J_0 + J_w)}$$

що буде відповідати вже тому стану сировини J_w , яка буде в майбутньому отримувати зміни, що пов'язані з впливом енергії E_w в термодинамічно нерівноважному стані. При цьому $\lambda \leq 1,0$ та наближається до одиниці, вказуючи на область теоретично обґрунтованого мінімального утворення відходів.

Тут і в подальших дослідженнях під термодинамічними силами X_i слід розуміти, зокрема, градієнт зміни одного з силових параметрів, що відносяться до конкретної технічної системи. Причому співвідношення між силами і потоками має бути лінійним за допомогою феноменологічних коефіцієнтів L_{ij} таким чином, що $J_i = \sum_j L_{ij} X_j$. Для самого загального випадку, в умовах технологічного процесу, коли має місце

перенос речовини (m) та енергії (e) в матеріальних потоках (J_i) за допомогою сил (X_i), що їх створюють, локальне виробництво ентропії можна представити наступним чином: $\sigma[S] = J_0 X_0 + J_w X_w > 0$.

Методика дослідження. Методика досліджень включала виявлення значень базових термодинамічних коефіцієнтів у послідовності технологій, що відносяться до виробництва хліба, незалежно від їх типу, якості та належності. У дослідженні приймається тільки традиційна технологія виготовлення хлібу шляхом термообробки тіста, що було попередньо приготовлено, з урахуванням поліпшених органолептичних та фізико-хімічних властивостей, зокрема, гідратаційних, ферментаційних, теплових та інших здібностей вихідної сировини.

Вихідними даними для кожного з розглянутих технологічних процесів є статистична звітність про:

- величину зовнішньої енергії E_0 , що надходить у технологічний процес для переробки сировини на одиницю її маси;
- температурні параметри T_i власне технологічного процесу та зовнішнього середовища T_0 для розрахунку зміни ентропії;
- параметри сировини, яка підлягає переробці у конкретному технологічному процесі, а саме:
 - параметр матеріального потоку J_0 , який витрачається на отримання основної товарної продукції;
 - параметр матеріального потоку J_w , який становить весь первісний обсяг сировини у своїй відходоутворюючій частині;
 - запропоновану величину додаткової зовнішньої енергії $E_w \leq kE_0$ обраної якості, яка може дозволити вивести матеріальний потік J_w зі стану близького до термодинамічної рівноваги до нерівноважного стану.

Розрахунку підлягали показники:

- величина термодинамічної сили X_0 , що забезпечує цілеспрямовану зміну матеріального потоку J_0 до стану товарної продукції;

- величина необхідної термодинамічної сили X_w , яка здатна змінити матеріальний потік J_w до максимальної можливості корисної продукції, у відповідності до типу технологічного процесу;

- зміна ентропії системи, залежно від стану її нерівноважності, відповідно до відомих рівнянь Л. Онсагера, теореми І. Пригожина та ін., залежно від змісту та закономірностей самого технологічного процесу (в дослідженні використовуємо інтегральну ентропію струтурованого технологічного процесу, як $\Delta S = \sum \Delta S_k^{\pm} \geq 0$, де $\Delta S_k^{\pm}$ відноситься до того з k -их етапів технології, які в даній системі змінюються в дисипативному ($\Delta S_k^{\pm} > 0$) або репаративному ($\Delta S_k^{\pm} \leq 0$) напрямках).

- зміна наведеної ентропії системи $\Delta S/E_0$ залежно від феноменологічного показника $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$ з подальшим виявленням його параметрів на кожному наступному n -му етапі ітерації.

Статистична обробка результатів дослідження виконана за допомогою програмного пакету Statistica 6.0. (StatSoft, Inc., США).

Термодинамічні сили в рівнянні Л. Онсагера можна виразити через макроскопічні параметри системи. У нашому випадку ми будемо враховувати тільки термодинамічні сили $X_T = -\frac{1}{T} \nabla T$ (K^{-1}), що викликані температурним градієнтом ∇T . Діаграма для оцінки теоретично обґрунтованого мінімуму відходів, що відносяться до технології промислового виробництва хліба, надана на рис. 1а.

Велике значення максимальної кількості зміни інтегральної ентропії (відносне значення $\frac{\Delta S_{\lambda=0,5}^{max}}{E_0} = 0,24 K^{-1}$ для $\lambda = 0,5$) на феноменологічній кривій Онсагера, при відносно невеликих значеннях цього показника в області отримання відходів (точка «а» на рис. 1), показує, що зміна стану термодинамічної рівноважності для тієї частини сировини J_w , з якої зазвичай виходять відходи, вимагає особливих умов для отримання додаткової зовнішньої енергії E_w , при яких термодинамічна сила не повинна перебільшувати значення $X_w \leq 1,24 \cdot 10^{-1} K^{-1}$ для $\lambda \geq 0,81$, щоб не порушити умови отримання основної товарної продукції. Це може бути як модифікована базова енергія E_0^w , що здатна впливати й на компоненти сировини J_0 , і на компоненти J_w , так і додаткова енергія спеціальної якості E_w , що здатна забезпечити або підвищені когезійні якості напівфабрикату, або виключити рівні можливості для температурної обробки різних компонентів вихідної сировини, при яких $\lambda \rightarrow 1,0$.

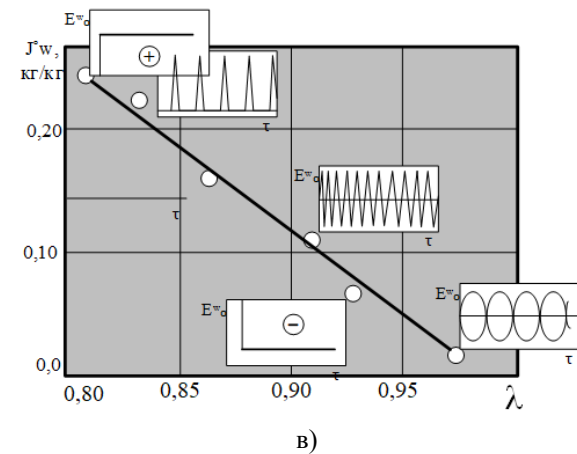
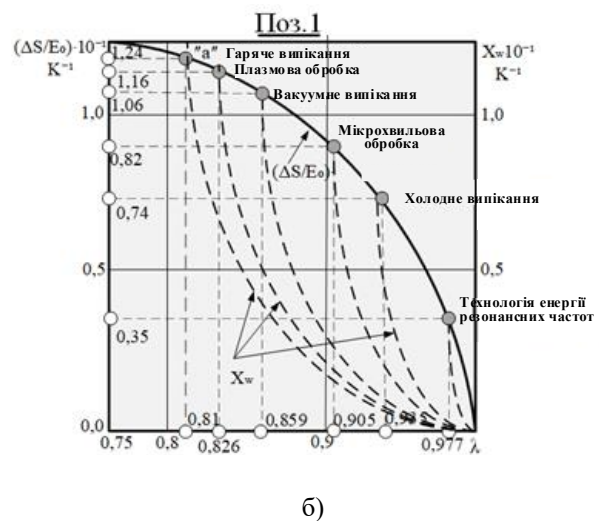
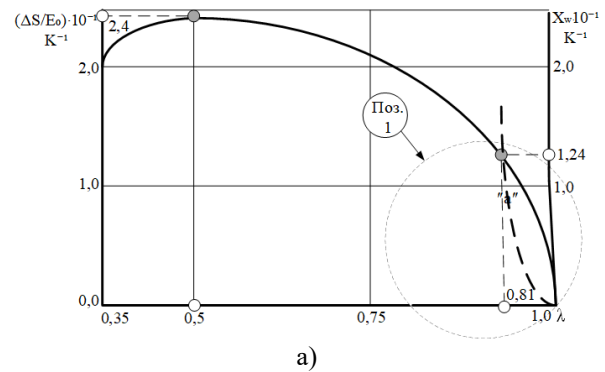


Рис. 1 – Схема для розрахунку та розрахункові дані щодо теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва хліба. Тут: а) – позиція теоретичного мінімуму відходів в технології виробництва хліба; б) – розрахункові дані (п. 1) щодо виявлення фактичного відходу утворення для різних технологій виробництва хліба; в) – залишкові відходи J_w^0 виробництва хліба при використанні модифікованої енергії E_0^w різних типів

Таким чином, висновок про утворення відходів в технологічному процесі виробництва хліба включає в себе наступне.

1. Матеріальні втрати в кількості 39% сировини (див. таблицю 1) при $\lambda \geq 0,81$ – це харчові відходи, які практично повністю утилізуються поза технологічним процесом отримання хліба і не представляють додаткового інтересу. Вони включають компостування (80-90% хлібних відходів), корми для тварин (60-70%), виробництво біогазу (50-60%), харчові добавки та продукти переробки (30-40%), термічну утилізацію (10-15%) та виробництво біопластику (5-8%).

2. У номенклатурі енергетичних відходів переважають теплові втрати (36-58% від енергії, що використовується), які неминучі в умовах переважно теплових процесів в технічних системах. Для того щоб мінімізувати їх в межах самого технологічного процесу, за принципом термодинамічної двоєдності [4], необхідно ввести в технологічний процес або додаткове джерело енергії $E_w \sim 0,62E_0$, або модифіковану базову енергію E_0^w , Наприклад, за принципом, зазначеним в роботі [6], по лінії розвитку основних модифікацій базової енергії – від зворотного знаку енергії до імпульсних і резонансних частотних полів (рис. 2).

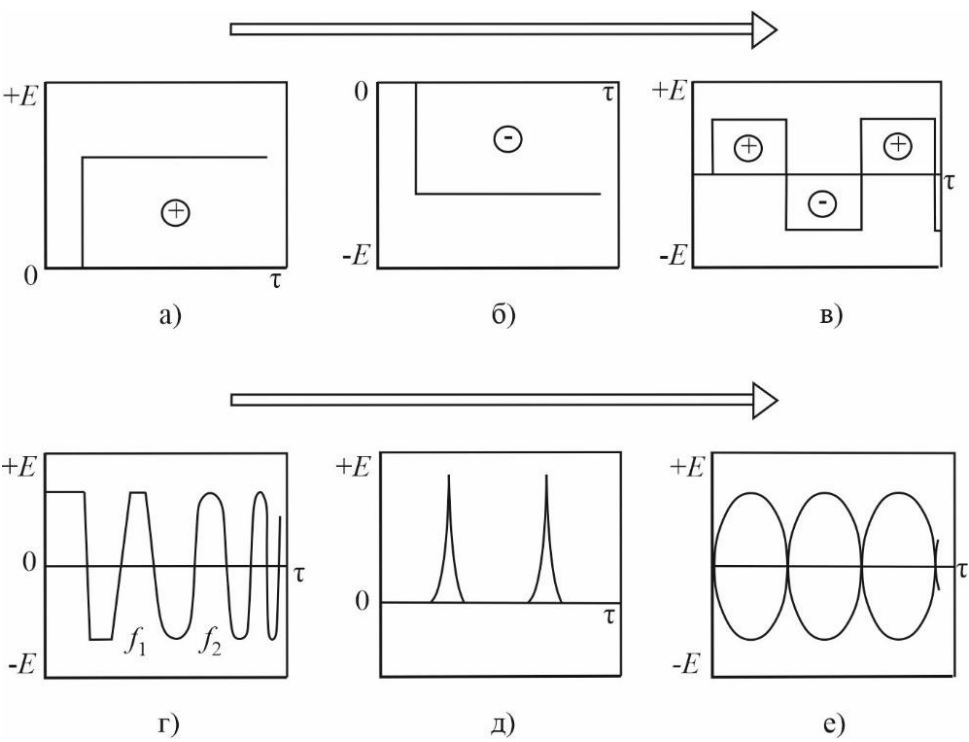


Рис. 2 – Лінія розвитку характеристик енергетичного поля, що використовується в технологічному процесі: а) енергія постійного знаку; б) енергія зворотного знаку впливу; в) змінна енергія; г) високочастотне змінне енергетичне поле; д) імпульсне енергетичне поле; е) резонансне частотне поле

Таблиця 2

Розрахункові дані для аналізу ефективності технологій виробництва хліба щодо мінімізації відходів за умови постачання в систему модифікованої енергії E_0^w

№№ п/п	Найменування та особливості технологічного Процесу	Вид показника			
		T, К	λ , ед.	$\Delta S/E_0$, K^{-1}	ΔQ_w , кДж/кг
1	Гаряча випічка	473-523	0,812	$1,24 \cdot 10^{-1}$	850-1160
2	Холодна випічна	320-330	0,935	$0,74 \cdot 10^{-1}$	200–400
3	Вакуумна випічка	390-410	0,859	$1,06 \cdot 10^{-1}$	300–520
4	Мікрохвильова обробка	350-450	0,906	$0,82 \cdot 10^{-1}$	450–700
5	Плазмова обробка	800-950	0,826	$1,16 \cdot 10^{-1}$	800–1200
6	Технологія енергії резонансних частот	320-370	0,977	$0,35 \cdot 10^{-1}$	150-200

Прикладом використання таких видів енергії в промисловому виробництві хліба можуть служити вже відомі технології (див. рис. 1б), описані А. Ханом, Дж. Смитом, П. Тейлором, М. Джонсоном, М. Финчем (2001-2020), зокрема:

-холодної випічки (див. поз. б, рис. 2), яка передбачає використання хімічних розпушувачів, які у взаємодії з кислотою сприяють виділенню вуглекислого газу, що піднімає тісто. Розрахункове значення $\lambda \leq 0,935$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0,74 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$;

-вакуумної випічки, при якій тісто нагрівається в умовах зниженого тиску, що значно знижує температуру випаровування води з тесту і прискорює цей процес ($\lambda \leq 0,859$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 1,06 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$);

-мікрохвильової обробки з використанням височастотних електромагнітних хвиль для нагрівання, а потім «приготування» тіста (див. поз. г, рис. 2). Швидкість випікання становить кілька хвилин при $\lambda \leq 0,906$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0,82 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$;

-плазмової імпульсної обробки (див. п. д, рис. 2) з використанням імпульсного плазмового генератора для обробки тіста, що дозволяє нагрівати хліб до потрібної температури без традиційних печей ($\lambda \leq 0,826$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 1,16 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$).

Свого дослідження чекає технологія використання енергії резонансних частот щодо власних частотних властивостей сировини (борошна, вологі в тесті та ін.).

Використання резонансних явищ між компонентами сировини і основною модифікованою енергією впливає на всі стадії технологічного процесу (табл. 3), на відміну від інших способів випічки хліба, наприклад, індукційний метод впливає тільки на випічку, холодний спосіб впливає, в основному, на процеси бродіння і гідратації і т.д. У технологіях виробництва хліба резонансний нагрів та обробка, наприклад, може використовуватися, у тому числі, для прискорення таких процесів, як желатинізація крохмалю, гідроліз і поліпшення реологічних властивостей тіста.

Використання резонансних явищ в системах виробництва хліба може бути дуже енергоефективним методом, враховуючи, що в цілому це маловідходне виробництво має основне джерело відходів у вигляді втраченої теплової енергії з втратами близько 1000 кДж/кг сировини, і навіть при використанні сучасних індукційних або інфрачервоних систем енергозабезпечення для спікання хліба – втрати досягають 400-700 кДж/кг сировини. У цьому ряду навіть розрахункові значення можливих втрат енергії при використанні резонансних технологій отримання випічки хліба можуть давати сумарні втрати тепла $\Delta Q_w \leq 120$ кДж/кг використовуваної сировини при значеннях $\lambda = 0,977$ і більш, при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0,35 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$ (див. рис. 1, в), тобто наближення до теоретичного мінімуму утворення відходів у самому джерелі – технологічному процесі.

Таблиця 3

Спеціальні властивості джерел базової енергії резонансних виток в технологіях виробництва хліба (за даними Д. Міллера, Р. Вільямса, С. Саблані – 2008-2019)

№№ п/п	Технологічні процеси в системі	Фізичні Залежності
1	Фізико-хімічні процеси. При резонансному впливі зовнішнього поля частота молекулярних коливань в компонентах тіста (вода та ін.) збільшується, що призводить до пришвидшення цих процесів. Резонансне поглинання енергії молекулами води прискорює її нагрівання і сприяє більш ефективному процесу клейстеризації крохмалю в тісті.	$\frac{dC}{dt} = k_0 C^m$, де С – концентрація речовини (наприклад, цукру, що утворюється при гідролізі крохмалю); k_0 – константа швидкості реакції; m – порядок реакції, який залежить від температури та ін. факторів (включаючи електромагнітн. вплив).
2	Зміна реологічних властивостей. Резонансні взаємодії дозволяють змінювати в'язкість тіста, його еластичність, текстуру. Частота молекулярних коливань в компонентах тіста збільшується, що призводить до пришвидшення цих процесів.	$\eta = \eta_0(1 + \alpha H^2)$. де: η – результуюча в'язкість; η_0 – початкова в'язкість; α – константа, що характеризує чутливість в'язкості до магнітного поля; H – магнітна напруженість.
3	Резонансний нагрів. Відноситься до резонансної взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з молекулами води з тіста. При співпадінні частоти зовнішнього впливу з власною частотою $\omega = \omega_0$, система поглинає максимальну кількість енергії, що й призводить до нагріву.	$\frac{d^2 A}{dt^2} + 2\gamma \frac{dA}{dt} + \omega^2 A = F(t)$. тут: γ – коефіцієнт демпфування (пов'язаний з в'язкістю води та іншими характеристиками середовища), ω_0 – власна частота молекул води; A – амплітуда; F(t) – зовнішня сила, пропорційна дії зовнішнього електромагнітного поля.

Безумовно, для такої давньої і розвиненої технології, як виробництво хліба, вже відомі джерела модифікованої основної енергії, в основі якої лежить теплова обробка, можуть надати вирішальний вплив на мінімізацію як матеріальних (органічних) відходів, так і втрат енергії. Сучасні джерела енергії: низькотемпературні, високочастотні нагрівачі, імпульсні джерела енергії вже показали свої результати (див. рис. 1в). Тим не менш, ресурси в самому технологічному процесі дозволяють розраховувати на можливість наближення до теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів, в тому числі і теплових втрат.

Висновки

Незважаючи на те, що сучасні технології виробництва хліба відрізняються відносно невеликою кількістю органічних відходів, які максимально утилізуються після їх створення, максимальним у виробництві є тепловий відхід, що безповоротно втрачається в технологічному процесі. Посилаючись на теоретично обґрунтований мінімум утворення відходів, запропонований метод введення модифікованої енергії резонансних коливань в технологічний процес дозволяє не тільки на порядок знизити втрати теплової енергії, але

й за рахунок резонансних взаємодій з молекулами сировинної води знизити втрати органічних відходів до максимально можливих 3% від сировини, що використовується в технології.

Перелік використаних джерел

- [1] Belitz H. D., Grosch W., Schieberle P. Food Chemistry. Berlin: Springer, 2009. 984 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7>.
- [2] Nielsen S. S. Food Analysis. 5th ed. Springer, 2017. 784 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5>.
- [3] Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва. К. : Профкнига, 2024. 516 с.
- [4] Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. К. : СПД Самченко, 2024. 80 с.
- [5] Волошин В. С. Відходи та їх природа. К. : СПД Самченко, 2024. 630 с.
- [6] Волошин В. С., Бурко В. А. The Principle of Thermodynamic Duality as a Basis for the Creation of Industrial Waste in Technological Processes. *Scientific Aspects of Conserving and Restoring Natural Resources Under the Modern Development of Society*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2024. Pp. 32-53.

FEATURES OF WASTE MINIMIZATION IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF BREAD PRODUCTION

Voloshyn V.S.

D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: vsvlshn52@gmail.com;

Burko V.A.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu

The paper considers studies related to waste minimization in traditional industrial technologies of bread production. It is shown that with a relatively small amount of organic waste that is easily disposed of in the post-production period, there is an irresistible amount of energy waste that reaches large sizes, related to the world production volumes of this important product for humans. Despite certain modern technologies and rates of bread production, the issue of industrial waste exists and is not solved. The article proposes the results of the study of the theoretically grounded minimum of waste of the general type, regarding the technology of bread production, develops a technique that allows using the principle of thermodynamic duality as a mechanism responsible for the generation of waste in the technological process, as the main one that allows minimizing the formation of waste within the technological process itself. The limits that exist in achieving the desired result, the distribution of the minimum possible waste between the stages of the technological process are shown, it is recommended to use modified energy of external influence, as able to process that part of the raw material that under certain conditions is able to get into waste, but with the help of new energy is capable of some useful qualities that make it a useful product within the technological process itself. It is shown how it is possible to use resonant energy sources to achieve the goal of minimizing energy losses in the technological process of bread production as much as possible. Referring to the theoretically grounded minimum of waste generation, the proposed method of introducing the modified energy of resonant oscillations into the technological process allows not only to reduce heat energy losses by an order of magnitude, but also to reduce the loss of organic waste to the maximum possible 3% of the raw materials used in the technology due to resonant interactions with raw water molecules.

Keywords: industrial waste, bread production, thermodynamic duality, minimal waste generation, energy waste, resonance.

References

- [1] H.D. Belitz, W. Grosch, and P. Schieberle, *Food Chemistry*. Berlin: Springer, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-69934-7.
- [2] S.S. Nielsen, *Food Analysis*, 5th ed. Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-45776-5.
- [3] V.I. Drobot, *Tekhnolohiia khlibopekarskoho vyrobnytstva* [Bakery production technology]. Kyiv, Ukraine: Profknyha Publ., 2024. (Ukr.)
- [4] V. Voloshyn, *Vidkhody ta termodynamika* [Waste and thermodynamics]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [5] V. Voloshyn, *Vidkhody ta yikh pryroda* [Waste and its nature]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [6] V.S. Voloshyn, and V.A. Burko, "The Principle of Thermodynamic Duality as a Basis for the Creation of Industrial Waste in Technological Processes," in *Scientific Aspects of Conserving and Restoring Natural Resources Under the Modern Development of Society*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2024. Pp. 32-53.

Стаття надійшла 25.05.2025

Стаття прийнята 20.06.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Волошин В. С., Бурко В. А. Особливості мінімізації відходів у технологічному процесі виробництва хліба. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 223-230. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344955>.

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.413.3.436

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344957

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ВАЛІВ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ

Агєєв М.С.	д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5691-8986 , e-mail: maxageev73-73@ukr.net ;
Дзигар А.К.	ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5947-6263 , e-mail: anatoliidzygar@gmail.com ;
Устінцев С.М.	аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4352-9479 , e-mail: sustincev@gmail.com

Однією з задач формування багатофункціональних покриттів для забезпечення заданого ресурсу вузлів тертя можна вважати врахування поведінки взаємозалежних параметрів системи «технологія відновлення – деталь – експлуатація». Випадкові зміни технологічних та експлуатаційних факторів ускладнюють оцінку параметрів матеріалу в процесі формування зносостійкого покриття та його вибір і не надає можливості внести коректування, а також врахувати структурні зміни в поверхневому шарі матеріалу в процесі технічної експлуатації. Останнім часом вирішення питання підвищення експлуатаційних властивостей вузлів тертя все тісніше пов'язують з розвитком способів нанесення зносостійких покриттів в процесі відновлювального ремонту. Вибір зносостійких покриттів проводиться за таким основним показником, як величина зносу [1]. Проте, одного лише цього аспекту недостатньо для оптимального визначення матеріалу та методу створення захисного покриття для деталей, що піддаються тертю. Важливо враховувати конструкційні та технологічні потреби, що виникають в процесі використання в цілому [2]. В статті представлена методика проектування технологічного процесу відновлення зношених поверхонь вузлів тертя. Може використовуватися як типова для складових технологічного процесу формування зносостійких покриттів, що забезпечує взаємодію між факторами, які характеризують технологічний процес, а також для виявлення керованих факторів. Об'єктом проектування є технологічний процес відновлення розподільного валу суднового двигуна шляхом нанесення багатофункціональних покриттів в процесі ремонту, що забезпечує заданий ресурс.

Ключові слова: технологічний процес, проектування, розподільний вал, технологічні параметри, експлуатаційні параметри, зносостійкі покриття, ремонт, ресурс.

Постановка проблеми

Задача проектування технологічного процесу відновлення зношених поверхонь розподільних валів суднових двигунів шляхом нанесення зносостійких покриттів – складна практична задача. Вирішення практичної задачі відновлення та одночасно зміцнення пошкоджених поверхонь розподільних валів суднових двигунів може здійснюватися як застосуванням вже існуючих технологій відновлення та зміцнення, так і за рахунок їхнього удосконалення та проектуванням нових технологічних процесів.

Завдання ускладняється у зв'язку з неоднаковістю і мінливістю умов експлуатації і, відповідно, швидкостей зношування шийок розподільних валів. Частина валів відмовляє до настання планових термінів чергових технічних обслуговувань та ремонтів, що призводить до вимушених простоїв суден і появи непланових робіт.

Відсутність єдиного, всеохоплюючого способу нанесення покриттів зумовлена тим, що кожен метод має свої обмеження та переваги. У певних умовах експлуатації певний метод може виявитися ефективним, тоді як в інших – ні. Кожен спосіб нанесення покриття

має свою специфічну сферу застосування. Крім того, один і той же матеріал може бути нанесений на поверхню різними способами. Зрештою, багато методів нанесення покриттів є взаємозамінними, що розширює можливості вибору оптимального рішення [3]. За допомогою нанесення захисних шарів неможливо досягти одночасного покращення абсолютно всіх характеристик виробу в будь-яких умовах використання. Навіть ідентичний матеріал, використаний для покриття, може демонструвати відмінності у своїх властивостях, залежно від застосованої технології нанесення. Зважаючи на широке різноманіття доступних методів створення зносостійких покриттів, постає задача вибору найбільш ефективного способу відновлення та покращення функціональних характеристик розподільних валів для забезпечення необхідного терміну служби [4].

Методика визначає найкращі технологічні послідовності для відновлення та зміцнення поверхні розподільних валів, що забезпечують максимальні експлуатаційні характеристики деталей за умови мінімізації витрат на їх ремонт.

При цьому конструювання системи типу «технологія зміцнення – розподільний вал – експлуатація»

ґрунтується не лише на зіставленні характеристик цієї системи з умовами її експлуатації, але й на співвідношенні властивостей покриття з характеристиками матеріалу розподільного валу.

Побудова нової методологічної схеми нанесення зносостійких покриттів, що дає змогу ефективно оптимізувати технологічні процеси створення зносостійких покриттів, враховуючи критерії їхньої експлуатаційної міцності, довговічності, цілісності структури, суцільності матеріалу і втомної міцності, є дуже актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботах [5, 6] автори рекомендують використання системного аналізу при розробці технологічних процесів. Це дає змогу впорядкувати всю початкову інформацію та визначити основні напрями для отримання оптимальних рішень. Системний підхід передбачає застосування комплексу методів, які дозволяють аналізувати складні об'єкти як єдине ціле, оцінювати різноманітні альтернативи (варіанти), кожна з яких характеризується широким набором змінних, а також забезпечувати повноту розгляду кожної альтернативи. Система може сприйматися як сукупність взаємопов'язаних елементів, що мають визначену структуру та допускають утворення ієрархії [5].

Згідно з дослідженням [7], автори наголошують на важливості впровадження методів управління стратегією на визначених етапах проектування технологічного процесу зміцнення шийок розподільних валів. Основною метою при цьому є забезпечення максимальної лінеаризації процесу проектування, що включає інтеграцію паралельних етапів і мінімізацію циклічності, особливо на високих рівнях проектування. Проте обмежена доступність необхідної інформації може ускладнювати реалізацію лінійної стратегії. У зв'язку з цим рекомендується здійснювати поділ процесу проектування на окремі задачі для поліпшення його структурованості й ефективності [7].

Під час розробки технологічного процесу нанесення зносостійких покриттів і підвищення експлуатаційних характеристик розподільних валів важливо обрати метод, який забезпечить максимальний строк служби деталі та мінімальну її собівартість [8]. При цьому необхідно враховувати ключові умови для створення якісних покриттів: вплив матеріалу деталі на склад покриття повинен бути мінімальним, а термічне навантаження на деталь – якомога нижчим [8].

Систему «технологія відновлення – розподільчий вал – експлуатація» слід розглядати як єдину конструкцію, оскільки існує різниця між властивостями матеріалів деталі і нанесеного покриття. На місці контакту між покриттям і відновлюваною поверхнею деталі формується перехідна зона. Вибір матеріалу покриття здійснюється з урахуванням матеріалу самої деталі та умов її експлуатації. Метод нанесення покриття визначається робочою температурою компонентів покриття

та геометричними характеристиками виробу [8].

Спираючись на результати проведеного аналізу можна зробити висновок, що розробка уніфікованої методики з проектування технологічного процесу зміцнення вузлів тертя допоможе вирішити проблему нанесення багатофункціональних покриттів на типові деталі. Уніфікована методика надасть змогу враховувати при проектуванні взаємозв'язок технологічних та експлуатаційних факторів, що, в свою чергу, забезпечить заданий ресурс відновлюваної деталі.

Мета статті

Розробка науково-практичного апарату, який дозволяє проектувати технологію відновлення та зміцнення шийок розподільних валів судових двигунів, що забезпечує задану довговічність за прийнятною вартості.

Виклад основного матеріалу

У системі «технологія відновлення – розподільчий вал – експлуатація» розподільний вал являє собою об'єкт дослідження з наступними блоками: вхідні параметри, процеси, вихідні параметри. В нашій роботі запропоновано розділити вхідні параметри на технологічні, експлуатаційні та перешкоди (рис. 1). Такий поділ дозволяє в явному вигляді виділити вплив технологічних параметрів на елементи вузла тертя. Вхідні експлуатаційні параметри системи утворюють блок, що характеризується за допомогою параметрів руху та прикладених до вузла тертя сил.

Функція системи, представлена на рис. 1, полягає у перетворенні вхідних параметрів у вихідні параметри:

$$\{P_m, F_e, V\} \xrightarrow{t} \{Q, N\},$$

де P_m – технологічні параметри; F_e – експлуатаційні параметри; V – перешкоди; t – час експлуатації; Q – вихідні параметри; N – втрати

Вхідні параметри:

Технологічні параметри: твердість, межа міцності (плинності) та модуль пружності покриття, структура зносостійкого покриття, початковий масляний зазор між шийкою та вкладишем, величина зносу.

Експлуатаційні параметри: характеристика масла (хімічний склад, динамічна в'язкість, наявність механічних домішок тощо), режим мащення, частота обертання тощо.

Перешкоди: перевантаження двигуна, несправності інших вузлів (заїдання поршневих кілець, несправність форсунок може побічно впливати на роботу розподільного валу).

Вихідні параметри:

Показники довговічності;

Інтенсивність зношування;

Мінімальна вартість.

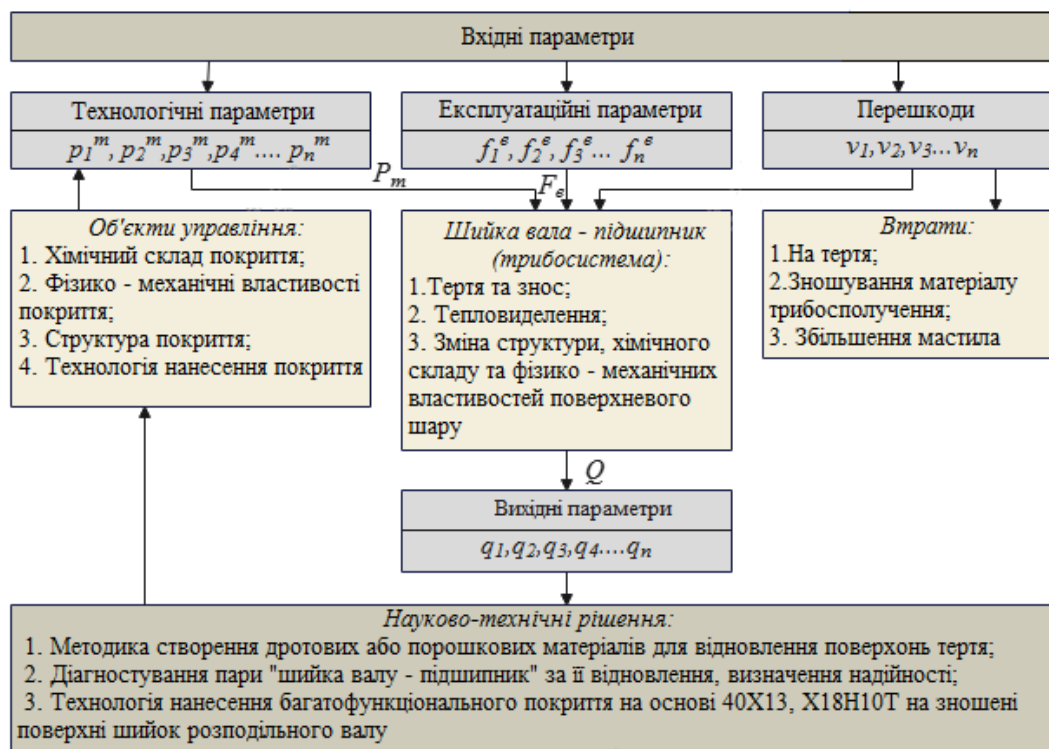


Рис. 1 – Блок-схема системи «технологія відновлення – розподільний вал – експлуатація»

Під час роботи розподільного валу на нього впливають сили інерції обертових мас та сили інерції мас, які здійснюють зворотно-поступальний рух. У сукупності ці фактори спричиняють знакозмінні крутні та згинальні моменти, а також викликають крутильні та поздовжні коливання, що при резонансі створюють додаткові напруження. Оскільки дії зазначених сил і моментів є змінними як за величиною, так і за напрямком, при розрахунку необхідно враховувати найбільш несприятливі умови експлуатації валів [9].

У процесі експлуатації шийки валу змащуються під тиском мастилом, яке подається через канали блоку-картера та внутрішню порожнину валу. Вони функціонують у парі з підшипниками ковзання, перебуваючи в умовах гідроабразивного зносу. Під час роботи на шийки валів впливають циклічні навантаження, що прискорюють їх зношування і в окремих випадках можуть спричинити вигин валу. При постійних зовнішніх умовах тертя та характеру контактування структурні фактори та фізико-механічні властивості поверхневого шару відіграють вирішальну роль у підвищенні зносостійкості.

Отже, найбільш перспективними об'єктами управління для забезпечення заданої довговічності шийок розподільного валу є хімічний склад і структура зносостійкого матеріалу, які, в свою чергу, багато в чому визначають фізико-механічні властивості покриття, а також параметри режиму формування.

Лабораторні випробування матеріалів на тертя та знос не забезпечують впливу всіх експлуатаційних факторів на пару тертя, не кажучи про перешкоди, які оказують не останній вплив на достовірність результатів випробувань. Стендові випробування забезпечують вплив експлуатаційних факторів, але не має можливості відтворити вплив перешкод. Тільки підконтрольні експлуатаційні випробування розподільних валів на судах, безпосередньо на двигуні, забезпечують можливість отримання достовірної інформації про всі вихідні параметри.

Деякі параметри, що визначаються під час випробувань, наприклад, знос, сила або момент тертя, не вимагають обговорення, чого не можна сказати про температуру. Температура – один із суттєвих параметрів, що характеризують трибологічні процеси, вона є однією з причин втрат при терті N , а також перешкод V .

Температура відіграє значну роль у зносі шийок розподільних валів судових дизелів. Високі температури можуть призвести до теплового розширення матеріалів, що збільшує зазор між шийками і підшипниками, знижує здатність мастила, що змащує, і, як наслідок, прискорює знос. Перепади температур у різних частинах двигуна, особливо в районі шийок розподільного валу, можуть створювати теплові напружки, які також сприяють зношуванню [10].

Підвищення довговічності розподільних валів з використанням технологічних методів нанесення зносостійких покриттів на робочі поверхні шийок

розподільчих валів можна розбити на три взаємопов'язані етапи (рис. 2):

- проектування технологічного процесу та відновлення деталі;
- експлуатацію відновлених плунжерних пар та оцінку їх надійності;
- удосконалення технології та організації технологічного процесу за результатами підконтрольної експлуатації відновлених деталей з метою підвищення довговічності.

Для ефективного управління процесом формування технологічних та експлуатаційних властивостей розподільних валів розроблена методика проектування уніфікованих технологічних процесів відновлення та зміцнення нанесенням багатофункціональних покриттів, що враховує всі етапи досліджень, рішення технологічних та оптимізаційних завдань.

При розробці технологічного процесу відновлення розподільного вала захисними покриттями необхідно враховувати і прогнозувати рівень допустимих напружень, який визначається значеннями величин адгезії покриття і когезійної взаємодії в системі «відновлювана поверхня – покриття». Будь-які напруження,

які спричиняють деформацію всього виробу або окремих його частин, впливають на адгезійні та когезійні властивості покриття й зрештою визначають його функціональність.

На експлуатаційні властивості шийок розподільних валів впливають як фізико-механічні властивості матеріалу поверхневого шару (твердість, ступінь зміцнення, залишкові напружки, межі міцності та витривалості тощо), так і геометричні показники поверхні (розмірна точність, відхилення форми, тощо) [11].

Довговічність деталі, відновленої нанесенням зміцнюючого покриття, залежатиме від структурного стану і параметрів (технологічний процес) та умов роботи (експлуатаційних факторів) розподільного вала, а також від характеру та ступеня впливу технології нанесення покриття на деталь в цілому.

Прийняття правильного рішення щодо вибору технологічного процесу з урахуванням структурних та енергетичних параметрів розподільного вала в процесі експлуатації дозволить забезпечити потрібний ресурс при мінімальних матеріальних затратах на її відновлення.

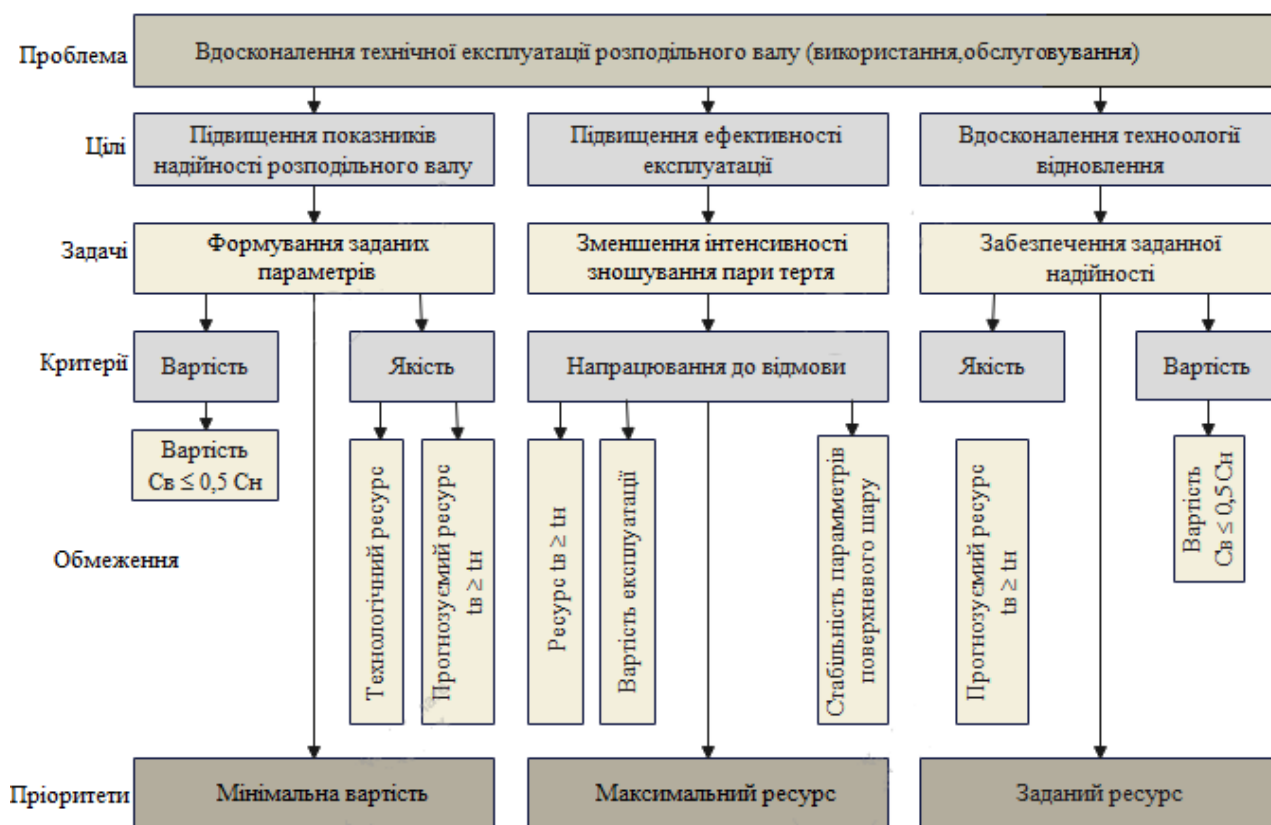


Рис. 2 – Структура цілей та завдань при розробці технологічного процесу відновлення розподільних валів: S_v – вартість відновленої деталі; S_n – вартість нової деталі; t_v – ресурс відновленої деталі; t_n – ресурс нової деталі

Для ефективного вирішення проблеми підвищення надійності та продовження терміну служби розподільних валів встановлено системну взаємодію факторів, які впливають на технологічний процес їх відновлення та зміцнення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів (рис. 3). Вибір або розробка параметрів, які визначають стан процесу та впливають на його ефективність та якість (критеріальні параметри) при проектуванні технологічного процесу, забезпечить потрібну довговічність шийок розподільних валів. Виходячи з цього, можна сказати, що в основі факторів впливу на прийняття технологічного рішення лежать якісні та кількісні характеристики деталі та технологічного процесу відновлення та технологічні можливості ремонтного виробництва. Вибір номінальних значень критеріальних параметрів технологічного процесу здійснюється на підставі домінуючого виду зношування та заданого ресурсу (блоки 2.1, 3.1).

Аналіз і структуризацію об'єкта дослідження слід проводити з метою визначення критеріїв оптимізації (розглянуті в блоках 2.2 і 2.8), формування переліку незалежних змінних (факторів), а також встановлення складу контрольованих, некерованих і керованих

змінних. У цьому процесі визначаються рівні варіювання та фіксації для некерованих параметрів. Оптимізація методики відновлення і зміцнення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів здійснюється на основі результатів експериментального дослідження системи «відновлювана поверхня – покриття». Основою для цього є вибраний критерій оптимізації, який спрямований на досягнення мінімального або максимального значення залежно від поставленої мети.

Після вибору оптимальних параметрів процесу напилення визначають спосіб механічної обробки шийок розподільного валу для отримання необхідного зазору. Специфіка будови та фазовий склад захисних шарів зумовлюють необхідність застосування особливих підходів до їх механічної обробки. Ці підходи відрізняються від тих, що використовуються для обробки деталей, виготовлених з однорідних металів. Розуміння характеристик покриттів дає можливість оптимізувати процес їх механічної обробки, мінімізуючи витрати. Для обробки покриттів можна використовувати широкий спектр методів, включаючи свердління, точіння, фрезерування та шліфування.

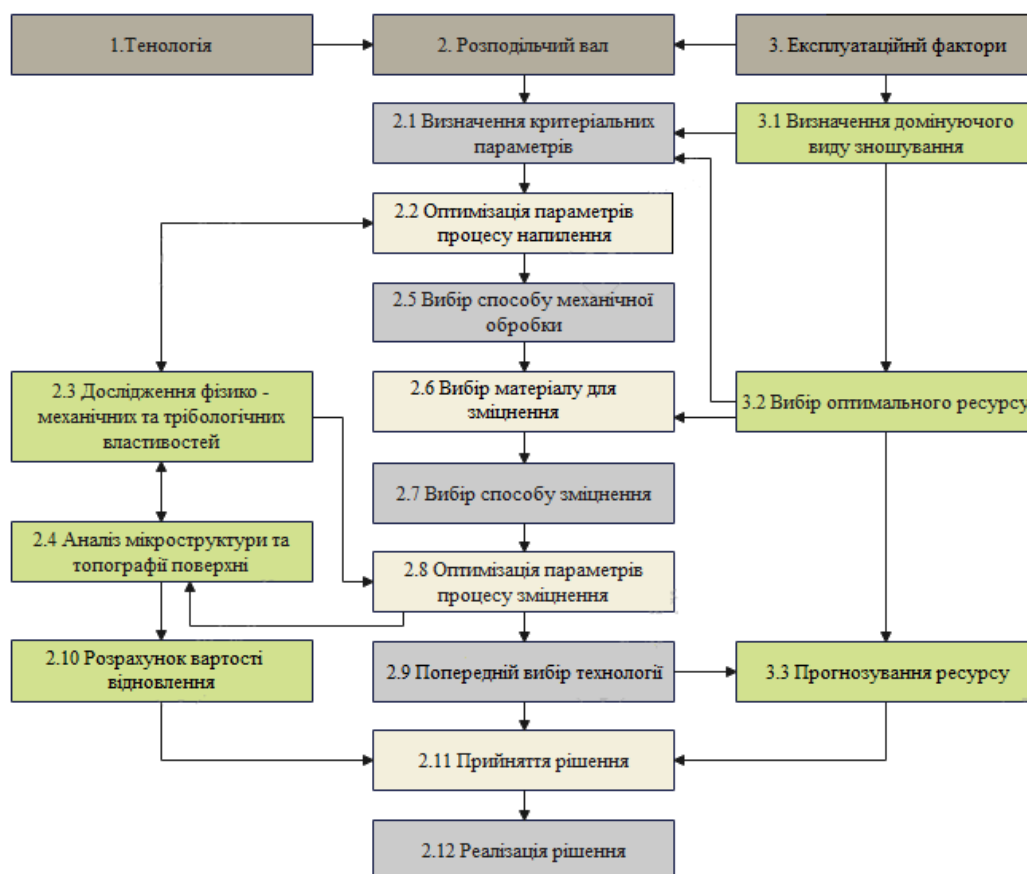


Рис. 3 – Блок-схема проектування технології відновлення та зміцнення шийок розподільного валу суднового двигуна нанесенням багатофункціональних покриттів

Важливим фактором для ефективної механічної обробки нанесених шарів є те, що сили, які з'являються під час різання, мають бути направлені не на відділення покриття від оброблюваної деталі, а на забезпечення притискання шару напиленого матеріалу до поверхні основи (блок 2.5).

Вибір матеріалу для покриття має суттєве значення під час розробки методики зміцнення й відновлення. Головне завдання такого матеріалу – поліпшення фізико-механічних показників відновлених поверхонь шийок розподільних валів, адже саме вони впливають на їхні ресурсні показники [12]. Характеристики обраного матеріалу для покриття залежать від умов, в яких працюють деталі, та їхньої конструкції. Оскільки знос розподільних валів є найчастішою причиною їхньої несправності (близько 80%), вимоги до зносостійких покриттів мають враховувати тип зносу, а їхній вибір має базуватися на результатах тривалих випробувань деталей на зносостійкість [13]. Умови зовнішнього середовища і руйнування робочої поверхні деталі визначають необхідний склад, структуру, фазовий стан і властивості матеріалу покриття. Властивості матеріалу впливають на зносостійкість і стійкість до корозії в конкретних умовах експлуатації і можуть змінити підхід до вибору матеріалів для цих умов експлуатації (блок 2.6). Найбільш перспективними матеріалами для зміцнення поверхонь тертя розподільних валів є дрти зі сталі 40X13, X18H10T аустенітного та мартенситного класу.

Як ефективний метод підвищення зносостійкості відновлених поверхонь, запропоновано азотування в імпульсному режимі, що одночасно формує високоміцні поверхневі шари і підвищує експлуатаційні характеристики (блок 2.7) [14].

Вибір оптимального ресурсу відновлюваної деталі (блок 3.2) полягає у визначенні оптимального ресурсу, який, як правило, дорівнює половині ресурсу двигуна. У разі неможливості технологічного забезпечення ресурсу відновленої деталі, на рівні ресурсу дизеля, він повинен бути не меншим за ресурс нової деталі.

Заключним етапом аналізу розробленого варіанта технологічного процесу відновлення є прогнозування ресурсу відновленої деталі [15], а також розрахунок вартості, визначення економічної ефективності та доцільності відновлення деталі (блоки 3.2, 2.11).

Ключовим фактором економічної вигоди від ремонту є відновлення деталей, що сприяє значній економії сировини, енергоресурсів та трудових витрат. Процес відновлення зношених елементів передбачає застосування технологій, спрямованих на повернення їхньої працездатності та продовження терміну служби. Це досягається шляхом відновлення втраченого матеріалу внаслідок зносу та/або корегування їхніх властивостей, які змінилися в процесі використання, до відповідних нормативних показників [16]. Приведення до відповідності стандартам стосується таких параметрів: стійкість до зношування, міцність, габарити та рівень

шорсткості робочих поверхонь; показники маси деталі та її розподіл відносно осей обертання та інерції; опірність корозії; витривалість до циклічних навантажень. Кожна з цих характеристик визначає якість відновленої деталі (блок 2.11).

Після проектування технології відновлення на підставі економічного аналізу та розрахунку довговічності деталі приймається остаточне вирішення питання: чи забезпечує технологічний процес усі технічні вимоги до деталі з урахуванням досвіду попередньої експлуатації та заданий ресурс? [17] (блок. 2.11) Крім того, вартість відновленої деталі повинна бути, як правило, не більше, ніж 50% від вартості нової. Після ухвалення рішення про доцільність впровадження розробленого технологічного процесу виготовляється дослідна партія деталей, їхня підконтрольна експлуатація проводиться для оцінки ресурсу відновлених розподільних валів [17] (блок 2.12).

Висновки

В статті представлена методика проектування технологічного процесу відновлення зношених поверхонь розподільного валу. Може використовуватися як типова для складових технологічного процесу формування зносостійких покриттів, що забезпечує взаємодію між факторами, які характеризують технологічний процес, а також для виявлення керованих факторів.

Для ефективного управління процесом формування технологічних та експлуатаційних властивостей розподільних валів розроблена методика проектування уніфікованих технологічних процесів відновлення та зміцнення нанесенням багатофункціональних покриттів, що враховує всі етапи досліджень, рішення технологічних та оптимізаційних завдань.

Запропонована методологічна схема відновлення розподільних валів судових двигунів зносостійкими покриттями дозволяє проводити оптимізацію технологічних схем отримання покриттів за критеріями їх експлуатаційної міцності, довговічності, цілісності структури, суцільності матеріалу і втомної міцності.

Перелік використаних джерел

- [1] Агєєв М. С., Шпак Л. М., Кавун В. І. Using combined technology of coating deposition for renovation of ship diesel generator shafts. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції присвяченої пам'яті професорів Фомина Ю.Я. і Семенова В.С.*, Одеса (Україна) – Стамбул (Туреччина) – Одеса (Україна), 18-22 квітня 2019 р. С. 126-129.
- [2] Systematic approach to the study of working surfaces wear of automotive and tractor equipment parts / M. I. Chernovol et al. *Problems of Tribology*. 2024. Vol. 29, no. 1/111-2024, Pp. 53-60. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-111-1-53-60>.
- [3] Агєєв М. С., Манжелей В. С., Дзигар А. К. Нанесення захисних покриттів для підвищення

- зносостійкості та ресурсу при ремонті валів суднових СДВЗ. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування* : матеріали 11-ої Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 08-10 вересня 2020 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2020. С. 236-239.
- [4] Агеєв М. С., Черненко В. В. Розробка та реалізація концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту в процесі ремонту на базі системного аналізу. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. Вип. 44. С. 62-72. DOI: <https://doi.org/10.32782/2225-6733.44.2022.8>.
- [5] Пацера С. Т., Проців В. В. Системно-структурна оптимізація процесів обробки на верстатах з ЧПК: конспект лекцій. Д. : НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. 91 с.
- [6] Saunders S. R. J., Nicholls J. R. Coatings and surface treatments of high temperature oxidation resistance. *Materials Science and Technology*. 1989. Vol. 5. Pp. 780-788. DOI: <https://doi.org/10.1179/mst.1989.5.8.780>.
- [7] Агеєв М. С., Устінцев С. М. Управління технологією відновлення поверхонь деталей транспортних засобів у процесі ремонту. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування* : матеріали 13-ї Міжн. наук.-практ. конф., м. Херсон, 7-9 вересня 2022 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2022. С. 169-173.
- [8] The methodologies and strategies for the development of novel material systems and coatings for applications in extreme environments - a critical review / M. Urbina et al. *Manufacturing review*. 2018. Vol. 5. Article 9. DOI: <https://doi.org/10.1051/mfreview/2018006>.
- [9] Стецько А. Є. Технологічне забезпечення ресурсу роботи виготовлених і відновлених деталей: монографія. Львів: Видавнича компанія «АРС», 2013. 240 с.
- [10] Testing scuffing resistance of materials for marine 2-stroke engines – Difficulties with lab scale testing of a complex phenomenon / P. Olander et al. *Wear*. 2015. Vol. 340-341. Pp. 9-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.06.015>.
- [11] Большаков В. І., Глушкова Д. Б., Костіна Л. Л. Вибір оптимальних режимів відновлення підшипників. *Металургія та термічна обробка металів*. 2015. № 4. С. 43-48.
- [12] Нанесення покриттів: підручник / Корж В. М., Кузнецов В. Д., Борисов Ю. С., Ющенко К. А.; за редакцією К. А. Ющенко. К. : Арістей, 2005. 204 с.
- [13] Crawmer D. E. Coating structures, properties, and materials. *Handbook of thermal spray technology*. 2013. Pp. 60-64. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v05a.a0005755>.
- [14] Ahieiev M., Gritsuk I., Litikova A. Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. *SAE Technical Paper Series*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.4271/2021-01-5100>.
- [15] Milewsski W., Sartowski M. Some properties of coatings ARC-spread in nitrogen or argon atmosphere. *Advances in Thermal Spraying* : Proceedings of the ITSC 86, Montreal, Canada, 8-12 September 1986. New York: Pergamon Press, 1986. Pp. 467-475.
- [16] Черновол М. І., Шепеленко І. В. Системний підхід до формування показників якості відновлених деталей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7 (38), ч. 1. С. 30-36. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.30-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.30-36).
- [17] Крисськов О. Д. Економічна оцінка технологічного рішення в момент його прийняття. *Машиностроение и техносфера XXI века* : сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Севастополь, 15 - 20 сентября 2008 г. Донецк, 2008. Т. 2. С.161-165.

METHODOLOGY FOR DEVELOPING A TECHNOLOGICAL PROCESS FOR RESTORATION OF CAMSHAFT OF MARINE ENGINES WITH WEAR-RESISTANT COATINGS

Ahieiev M.S.	D.Sc. (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5691-8986 , e-mail: maxageev73-73@ukr.net ;
Dzygar A.K.	senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5947-6263 , e-mail: anatoliidzygar@gmail.com ;
Ustintsev S.N.	postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4352-9479 , e-mail: sustincev@gmail.com

One of the tasks of forming multifunctional coatings to ensure a given friction nodes resource can be considered to be taking into account the behavior of interdependent parameters of the system «repair technology - part – operation». Random changes in technological and operational factors complicate the assessment of material parameters in the process of forming a wear-resistant coating and its selection and do not provide the opportunity to make adjustments, as well

as to take into account structural changes in the surface layer of the material during technical operation. In recent years, the solution to the problem of increasing the operational properties of friction nodes has been increasingly linked to the development of methods for applying wear-resistant coatings in the process of restoration repair. The selection of wear-resistant coatings is carried out according to such a basic indicator as the magnitude of wear [1]. However, this aspect alone is not enough to optimally determine the material and method for creating a protective coating for parts subject to friction. It is important to consider the structural and technological needs that arise during the use process as a whole [2]. The article presents a methodology for designing a technological process for restoring worn surfaces of friction nodes. It can be used as a typical one for components of the technological process for forming wear-resistant coatings, which ensures interaction between factors that characterize the technological process, as well as for identifying controllable factors. The object of design is the technological process of restoring the camshaft of a ship's engine by applying multifunctional coatings during the repair process, which ensures a given service life.

Keywords: technological process, design, camshaft, technological parameters, operational parameters, wear-resistant coatings, repair, resource.

References

- [1] M.S. Ahieiev, L.M. Shpak, and V.I. Kavun, "Using combined technology of coating deposition for renovation of ship diesel generator shafts," in *Proc. of the Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the memory of professors Fomin Yu.Ya. and Semenov V.S.*, Odessa (Ukraine) – Istanbul (Turkey) – Odessa (Ukraine), Apr. 18-22, 2019, pp. 126-129.
- [2] M.I. Chernovol, V.M. Kropivnyi, Y.V. Kuleshkov, I.V. Shepelenko, and V.I. Gutsul, "Systematic approach to the study of working surfaces wear of automotive and tractor equipment parts," *Problems of Tribology*, vol. 29, no. 1/111-2024, pp. 53-60, 2024. doi: [10.31891/2079-1372-2024-111-1-53-60](https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-111-1-53-60).
- [3] M.S. Ahieiev, V.S. Manzhelei, and A.K. Dzygar, "Nanesennia zakhysnykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti ta resursu pry remonti valiv sudnovykh SDVZ" ["Application of protective coatings to increase wear resistance and service life when repairing ship propeller shafts"], in *Proc. of the 11-th Int. Sci.-Pract. Conf. «Modern energy installations in transport and technologies and equipment for their maintenance»*, Kherson, Ukraine, Sept. 08-10, 2020, pp. 236-239. (Ukr.)
- [4] M.S. Ahieiev, and V.V. Chernenko, "Rozrobka ta realizatsiia kontseptsii zabezpechennia nadiinosti vidnovliuvanykh detalei zasobiv transportu v protsesi remontu na bazi systemnoho analizu" ["Development and implementation of the concept of ensuring the reliability of recoverable parts of means of transport during the repair process based on a system analysis"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriia: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 44, pp. 62-72, 2022. doi: [10.32782/2225-6733.44.2022.8](https://doi.org/10.32782/2225-6733.44.2022.8).
- [5] S.T. Patsera, and V.V. Protsiv, *Systemno-strukturna optymizatsiia protsesiv obrobky na verstatakh z ChPK: konspekt lektsii* [System-structural optimization of machining processes on CNC machines: lecture notes]. Dnipro, Ukraine: NTU «Dnipro Polytechnic» Publ., 2020. (Ukr.)
- [6] S.R.J. Saunders, and J.R. Nicholls, "Coatings and surface treatments of high temperature oxidation resistance," *Materials Science and Technology*, vol. 5, pp. 780-788, 1989. doi: [10.1179/mst.1989.5.8.780](https://doi.org/10.1179/mst.1989.5.8.780).
- [7] M.S. Ahieiev, and S.M. Ustintsev, "Upravlinnia tekhnolohiieiu vidnovlennia poverkhon detalei transportnykh zasobiv u protsesi remontu" ["Management of technology for restoring vehicle parts surfaces during repair"], in *Proc. of the 13-th Int. Sci.-Pract. Conf. «Modern energy installations in transport and technologies and equipment for their maintenance»*, Kherson, Ukraine, Sept. 07-09, 2022, pp. 169-173. (Ukr.)
- [8] M. Urbina et al., "The methodologies and strategies for the development of novel material systems and coatings for applications in extreme environments - a critical review," *Manufacturing review*, vol. 5, article 9, 2018. doi: [10.1051/mfreview/2018006](https://doi.org/10.1051/mfreview/2018006).
- [9] A.Ie. Stetsko, *Tekhnolohichne zabezpechennia resursu roboty vyhotovlenykh i vidnovlenykh detalei: monohrafiia* [Technological support of the service life of manufactured and restored parts: monograph]. Lviv, Ukraine: Publishing company «ARS», 2013. (Ukr.)
- [10] P. Olander, S.S. Eskildsen, J.W. Fogh, P. Hollman, and S. Jacobson, "Testing scuffing resistance of materials for marine 2-stroke engines - Difficulties with lab scale testing of a complex phenomenon," *Wear*, vol. 340-341, pp. 9-18, 2015. doi: [10.1016/j.wear.2015.06.015](https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.06.015).
- [11] V.I. Bolshakov, D.B. Hlushkova, and L.L. Kostina, "Vybir optymalnykh rezhymiv vidnovlennia pidshypnykiv" ["Selection of optimal bearing restoration modes"], *Metalurhiia ta termichna obrobka metaliv – Metallurgy and heat treatment of metals*, № 4, pp. 43-48, 2015.
- [12] V.M. Korzh, V.D. Kuznietsov, Yu.S. Borysov, K.A. Yushchenko, *Nanesennia pokryttiv: pidruchnyk* [Coating Application: Textbook], K.A. Yushchenko, Ed. Kyiv, Ukraine : Aristei Publ., 2005. (Ukr.)
- [13] D.E. Crawmer, "Coating structures, properties, and materials," in *Handbook of thermal spray technology*, 2013, pp. 60-64. doi: [10.31399/asm.hb.v05a.a0005755](https://doi.org/10.31399/asm.hb.v05a.a0005755).

- [14] M. Ahieiev, I. Gritsuk, and A. Litikova, "Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies," *SAE Technical Paper Series*, 2021. doi: 10.4271/2021-01-5100.
- [15] W. Milewsski, and M. Sartowski, "Some properties of coatings ARC-spread in nitrogen of argon atmosphere," in *Proc. of the ITSC 86 «Advances in Thermal Spraying»*, Montreal, Canada, Sept. 08-12, 1986, pp. 467-475.
- [16] M. Chernovol, and I. Shepelenko, «Systemnyi pidkhid do formuvannia pokaznykiv yakosti vidnovlenykh detalei» [«A Systematic Approach to Forming Quality Indicators for Refurbished Parts»], *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, vol. 7 (38), part 1, pp. 30-36, 2023. doi: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.30-36.
- [17] O.D. Kryskov, "Ekonomichna otsinka tekhnolohichnoho rishennia v moment yoho pryiniattia" ["Economic evaluation of a technological solution at the time of its adoption"], in *Proc. of the XV Int. Sci.-Pract. Conf. «Mechanical engineering and technosphere of the 21st century»*, Sevastopol, Ukraine, Sept. 15-20, 2008, vol. 2, pp. 161-165.
- Стаття надійшла 21.05.2025
Стаття прийнята 28.06.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Агєєв М. С., Дзигар А. К. Методика проектування технологічного процесу відновлення розподільних валів суднових двигунів зносостійкими покриттями. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 231-239. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344957>.

AN INTEGRATED MODEL OF CREW BEHAVIOR FACTORS INCORPORATION
INTO THE SHIP'S SAFETY SYSTEM

Nykytyuk P.	senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5905-3807 , e-mail: gilaevnyk@gmail.com ;
Melnyk O.	D.Sc. (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9228-8459 , e-mail: m.onmu@ukr.net ;
Koryakin K.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2388-645X , e-mail: eagleonx@gmail.com ;
Shchenyavskiy G.	senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7803-978X , e-mail: s.onmu@ukr.net

The article presents an integrated mathematical model for managing the operational safety of ships, which comprehensively takes into account both the technical aspects of the degradation of safety barriers and the behavioral factors of the crew. The authors substantiate the need to move from a purely technocratic approach to risk assessment to a multifactorial analysis that reflects the real dynamics of impacts in a complex marine environment. In particular, attention is focused on how the psychophysiological state of crew members (fatigue, emotional burnout, inattention) can accelerate the degradation of technical systems and lead to premature achievement of critical values of the integrated risk index (SIRI). The model is based on a modular approach with the ability to adapt to the type of vessel, the nature of the cargo, the level of automation and external conditions. The developed system allows not only to record the current level of risk, but also to predict future threats, taking into account changes in crew behavior and technical condition. For this purpose, it is proposed to use machine learning tools, in particular, models based on recurrent neural networks (such as LSTM), which are trained on sequences of ship state parameters. Particular attention is paid to the development of scenarios for the system's response to critical situations, and the possibility of integrating the model into digital navigation and diagnostic systems is substantiated. Numerical experiments and scenario analysis confirm the high efficiency of the model in predicting the development of emergencies, reducing response time and reducing the likelihood of catastrophic consequences. The proposed model is a step towards the creation of fully functional intelligent decision support systems (DSS) for a new generation of shipping, where risk management is carried out in real time, taking into account both technical and human factors.

Keywords: operational safety, maritime transport, maritime carriage, integrated risk index (SIRI), crew behavioral reliability, system degradation, condition monitoring, navigation safety, machine learning, neural networks, accident prediction, risk management, adaptive systems, situational awareness, preventive control, critical condition, scenario analysis, navigation factors.

Relevance of the study

Despite the high level of technical automation of modern sea vessels, the human factor remains decisive in ensuring operational safety. According to leading maritime organizations, more than 75% of fleet incidents and accidents are caused by crew errors that arise from cognitive overload, fatigue, inexperience, stress or procedural disruption. Traditional methods of risk analysis in the maritime sphere are focused mainly on technical and infrastructural aspects, while the influence of the psychophysiological state of a person on the functioning of security barriers remains poorly formalized. In the context of the growing autonomization and digitalization of marine systems, the development of hybrid models combining technical monitoring with behavioral analysis is relevant. This approach will make it possible to detect the risky state of the crew in a timely manner, adapt the parameters of the security system, implement preventive measures and minimize the probability of emergencies.

**Analysis of the latest achievements
on the identified problem**

Modern research in the field of operational safety of maritime transport demonstrates the growing integration of computer technologies, machine learning methods and the involvement of probabilistic analysis in risk assessment systems. In particular, considerable attention is paid to the application of deep learning algorithms for predicting the behaviour of ships in a real environment [1], assessing the consequences of accidents [2] and constructing traffic trajectory models [3]. Studies [4, 5] emphasize the role of safety barriers and propose methods for their quantification within the operational risk of shipping. Other works [6-8] study the effects of operational constraints, long-term loads and environmental changes on the resilience and vulnerability of ships. In [9-11], integrated approaches are proposed to optimize ship transition routes, manage time delays in ports and adapt port infrastructure to autonomous vessels. The extension of methods for forecasting the operational status of ship's equipment [12], energy efficiency [13-15] and system management [16] provides the basis for building multi-level intelligent models. Of particular note

are approaches integrating elements of artificial intelligence, Bayesian networks and neural network control to analyze behavioral scenarios and assess the impact of the human factor on ships in accident conditions [17, 18]. Within the framework of the study of operational safety of ships, integrated approaches to risk assessment and analysis of system degradation play a key role. Scientific work [19] demonstrates the importance of multiphysics modeling for complex technical systems, which is relevant for the marine industry, in [20] presents wavelet analysis as a tool for detecting resonant threats in mooring conditions. The work [21] uses deep neural networks to increase the operational efficiency of ships in ports, which reflects current digitalization trends. Scientific publications [22-25] focus on stressors, adaptive safety management, modern course-telling systems and ship information security, forming a conceptual framework for the creation of models that take into account barrier degradation, the SIRI risk index and adaptive response.

Scientific approaches to human factor assessment include CREAM (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*), STAMP (*System-Theoretic Accident Model and Processes*), SHELL (*Software, Hardware, Environment, Liveware*), HFACS (*Human Factors Analysis and Classification System*), which allow identification of potential errors in personnel behavior. Still, they are rarely integrated into dynamic models of operational risk assessment. The latest research in the field of maritime safety focuses on building digital profiles of operator behavior, assessing load through physiological sensors, and predicting crew actions through machine learning. However, there is a need for a holistic model that combines technical, organizational and behavioral factors into a single risk index, adapting the response logic depending on the condition of the crew.

Problem statement

Modern approaches to assessing the operational safety of sea vessels are based mainly on the technical parameters of systems and infrastructure, leaving out the key aspect – the behavioral component of the crew's activity. Human error caused by stress, fatigue, low situational awareness or violation of regulations remains the leading cause of maritime accidents. The available models either do not take into account behavioral factors at all, or evaluate them in isolation from the general structure of risk, which makes it impossible to form a coherent picture of safety. The lack of a dynamic indicator capable of integrating the psychophysiological state of the crew in real time into the decision-making system leads to a loss of response time and a decrease in the effectiveness of protective measures. Thus, there is a need to create an integrated model that combines technical risks with the behavioral characteristics of the crew, forming a new quality of adaptive ship safety management.

The purpose and tasks of the research

The purpose of this study is to create an integrated model for taking into account the behavioral factors of the crew in the operational safety system of a sea vessel, which allows to adaptively assess the level of risk in conditions of variable technical condition and psychophysiological burden on personnel. To achieve this goal, it is envisaged: analysis of existing approaches to safety assessment taking into account the behavioral aspects of the crew; development of a structural diagram of the relationship between technical risks and behavioral indicators; formalization of a mathematical model of the influence of the human factor on risk, taking into account psychophysiological characteristics; implementation of the method of adaptive monitoring of the crew's condition according to biometric and cognitive parameters; modeling of typical scenarios of behavioral deviations with subsequent calculation of integral risk; as well as substantiation of ways of implementing the developed model in digital platforms of operational management of ship processes.

Purpose and task statement

The purpose of this study is to create an integrated model for taking into account the behavioral factors of the crew in the operational safety system of a sea vessel, which allows to adaptively assess the level of risk in conditions of variable technical condition and psychophysiological burden on personnel. To achieve this goal, it is envisaged: analysis of existing approaches to safety assessment taking into account the behavioral aspects of the crew; development of a structural diagram of the relationship between technical risks and behavioral indicators; formalization of a mathematical model of the influence of the human factor on risk, taking into account psychophysiological characteristics; implementation of the method of adaptive monitoring of the crew's condition according to biometric and cognitive parameters; modeling of typical scenarios of behavioral deviations with subsequent calculation of integral risk; as well as substantiation of ways of implementing the developed model in digital platforms of operational management of ship processes.

Materials and methods

The methodology for creating a model for the integration of crew behavioral factors into the operational safety system is based on several key principles. First of all, a behavioral block (Behavioral Module, BM) is formed, which describes the cognitive, physiological and psycho-emotional indicators of crew members (stress, fatigue, attention, load) through a set of formalized indicators. These indicators are presented as normalized coefficients in the range [0,1] and vary dynamically with time, events and external conditions. Next, the functions of the influence of behavioral factors on the overall risk of the ship are developed, in particular through the modification of the function of degradation of safety barriers: the behavioral state of the

crew acts as a multiplier that accelerates or slows down the loss of barrier efficiency in critical subsystems.

To ensure the flexibility of the model, weighting factors of criticality of behavioral influences are introduced for different types of operations (navigation, cargo operations, emergency situations, etc.). These coefficients are adaptive in nature and vary depending on the type of vessel, its mode of operation and historical patterns of crew interaction with systems. The overall risk is determined through a modified integral safety index that takes into account the interaction of technical and behavioral risks in a

single system. This approach makes it possible to formalize the subjective influence of the crew on the condition of the vessel and provides a basis for algorithmic forecasting and timely management of threats.

Figure 1 shows a block diagram of the integrated model for incorporating crew behavioral factors into the ship's operational safety system. Technical state and behavioral indicators are processed through influence functions and adaptive weighting, resulting in a dynamic, unified safety index and improved threat management capabilities.

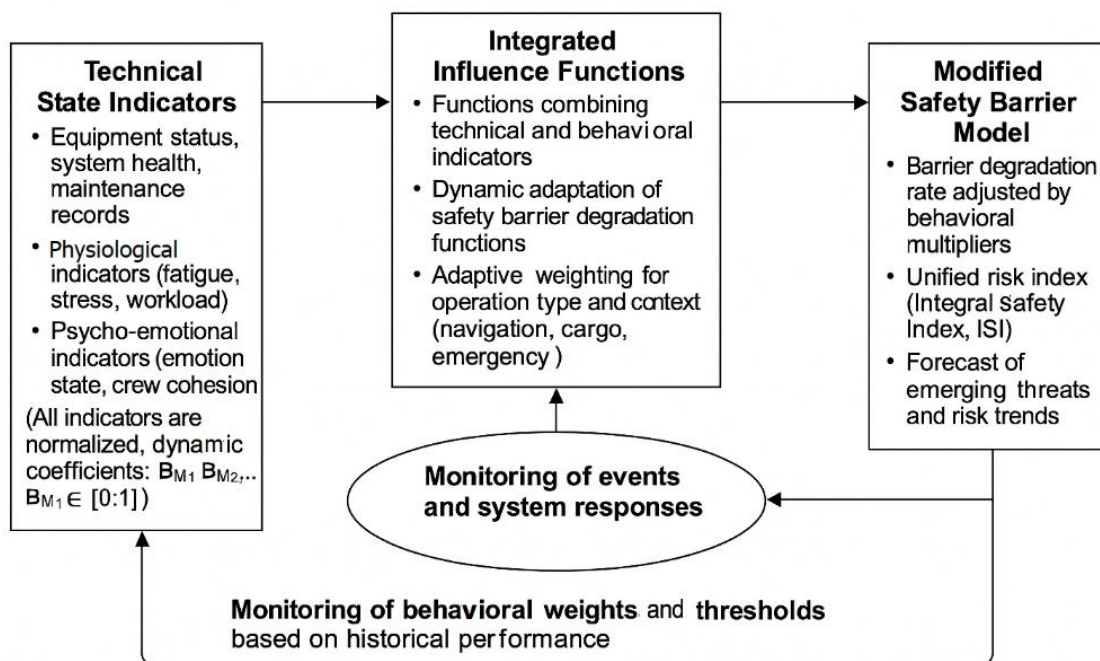


Fig. 1 – Framework for integration of crew behavioral factors into the ship operational safety system

Summary of the main material

Formalization of behavioral impact in a risk-based ship security system

The formalization of the integrated impact of crew behavioral factors on operational risk involves the development of a mathematical apparatus that allows to quantitatively link the crew's state with the functioning of technical and information barriers. For this purpose, a behavioral influence factor is introduced $B_i(t)$, which adjusts the security barrier degradation function as follows:

$$E_{B_i}^*(t) = E_{B_i}(t) \cdot B_i(t), \quad (1)$$

where $E_{B_i}^*(t)$ - modified barrier effectiveness under behavioral influences, and $B_i(t) \in [0.5, 1.2]$ - coefficient of influence on barrier degradation, which can reduce or increase the effectiveness depending on the crew condition.

The $B_i(t)$ itself is calculated based on the generalized index of crew behavioral reliability:

$$B_i(t) = 1 - \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot f_k(t), \quad (2)$$

where $f_k(t)$ - normalized indicators of behavioral factors (fatigue, stress, non-compliance with procedures), and α_k - weighting factors determined on the basis of expert opinion or training data.

The final risk index (*SIRI*) of the system takes the form:

$$SIRI(t) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot R_j(t) \cdot B_i(t), \quad (3)$$

which allows for adaptive risk assessment based on the human factor. Such a model not only improves the accuracy of predicting critical situations, but also creates a

basis for integrating crew psychophysiological monitoring into the ship's digital security system.

Mathematical model of the Behavioral Risk Index (BRI)

In order to integrate the human factor into the system of adaptive management of the operational safety of a ship, a behavioral risk index (BRI) has been developed that allows quantifying the actions of the crew, their psychophysiological state, workload, fatigue, and adequacy of response to risk situations. The main idea is to build a dynamic risk function, in which the behavioral component is included as a separate module that affects the overall effectiveness of safety barriers. The model takes into account the time degradation of the impact, the cumulative effect of errors, the impact of stress, and the adaptive change of weighting coefficients depending on the complexity of operations and environmental conditions.

Basic formula for the behavioral risk index $BRI(t)$ у момент часу t :

$$BRI(t) = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot f_i(t), \quad (4)$$

where: β_i - weighting factor for the i -th behavioral factor, $f_i(t)$ - function of the dynamics of the impact of the i -th factor (e.g., fatigue, stress, erroneous actions).

Then the model of behavioral capacity degradation looks:

$$f_i(t) = e^{-\lambda_i t} \cdot (1 - \delta_i(t)), \quad (5)$$

where: λ_i - impact degradation factor, $\delta_i(t)$ - cumulative crew error function.

A model of behavioral degradation $S_{total}(t)$:

$$S_{total}(t) = \alpha_T S_T(t) + \alpha_I S_I(t) + \alpha_B BRI(t), \quad (6)$$

where: $S_T(t)$, $S_I(t)$ - technical and informational components of risk, α_T , α_I , α_B - weighting factors (equal to 1 in total).

The function of adaptation of scales:

$$\alpha_B(t) = \frac{1}{1 + e^{-k(E(t) - E_{th})}}, \quad (7)$$

where: k - coefficient of sensitivity to emotional stress, $E(t)$ - crew stress level at the moment t , E_{th} - the threshold level.

The Table 1 presents the formalized parameters used in the BRI model, which integrates behavioral, technical, and informational subsystems in assessing ship operational safety.

Table 1

Parameters of the Behavioral Risk Influence (BRI) Model

Parameter	Description	Units
$R(t)$	Total operational risk level at time	dimensionless
$BRI(t)$	Behavioral Risk Influence at time t	dimensionless
$IRI(t)$	Informational Subsystem Indicator at time t	dimensionless
β_b	Weight coefficient for behavioral influence	dimensionless
β_t	Weight coefficient for technical subsystem	dimensionless
β_i	Weight coefficient for informational subsystem	dimensionless
$E_b(t)$	Efficiency of safety barriers affected by behavioral factors	dimensionless
$D_b(t)$	Degradation rate of safety barriers due to behavioral factors	1/h
$A_b(t)$	Adaptive correction coefficient for behavioral influence	dimensionless
$C_b(t)$	Cumulative behavioral stress factor	dimensionless
t	Time	h

These parameters are integrated through dynamic risk evaluation equations, where each factor contributes to the composite risk level and influences barrier degradation dynamics. The model allows real-time adaptation of risk estimations by updating weight coefficients and behavioral feedback variables. The cumulative behavioral factor $C_b(t)$ plays a critical role in determining the duration and magnitude of behavioral impact on system reliability.

Results and Discussion

Simulation of Operational Scenarios and Risk Evolution

To validate the effectiveness of the integrated behavioral safety model, a series of simulations were conducted

on different types of vessels (bulk carrier, tanker, and containership) under varying operational and behavioral conditions. The scenarios simulate gradual and critical degradation of safety barriers, with differing crew behavior patterns incorporated into the assessment through the Behavioral Risk Index (BRI).

Each scenario demonstrates how technical failures, environmental pressures, and behavioral degradation jointly impact the overall safety level and time to critical thresholds. The key indicators evaluated include: $SIRI$ (System Integrated Risk Index), $M(t)$ – safety margin, T_{crit} – time to critical state and $BRI(t)$ – behavioral risk contribution.

Figure 2 presents a comparative analysis for three types of vessels operating under high loads and shows the evolution of *SIRI* and $M(t)$ over time with annotations of critical points of risk escalation.

The graph on Fig.2 illustrates the change in the integrated risk index (*SIRI*) over time for three types of ships: a 35,000 dwt bulk carrier, a 50,000 dwt tanker, and a 5,000 TEU container ship. The modeling was performed taking into account the gradual degradation of safety systems and crew behavioral deviations that affect the effectiveness of barriers (e.g., fatigue, communication errors, response delays).

The main results as follows: the bulk carrier reaches the critical level of $SIRI \approx 0.85$ the fastest - in 44 hours of operation. The increased vulnerability to crew behavioral factors and the limited manual intervention in automated processes explains this dynamic. The tanker demonstrates a slow accumulation of risk - the critical threshold is reached after 56 hours. This is due to the high level of control and structured safety procedures typical of ships transporting dangerous goods. Container ships are the most resilient - the critical risk threshold is crossed only after 70 hours, due to the predictable nature of the routes and the

increased level of automation of navigation and technical systems.

Crew behavioral factors have a significant impact on the degradation rate: in scenarios with a changed crew condition, the time to reach critical values was reduced by 15-30% compared to baseline conditions. Thus, the graph allows to identify critical time points for each type of ship clearly - these moments are key to launching adaptive response measures. The inclusion of behavioral factors in the risk model allows for a more accurate prediction of hazard development over time.

The modeling results can be used to set personalized *SIRI* thresholds, develop scenarios for responding to system degradation, and adapt crew instructions to real-time. Thus, the model provides a dynamic risk monitoring tool that increases the adaptability of ship operations to behavioral and technical changes in a complex marine environment.

Figure 3 shows a visualization of the scenarios that demonstrates the dynamics of the integrated risk index (*SIRI*) depending on the levels of degradation of safety barriers and crew behavioral factors.

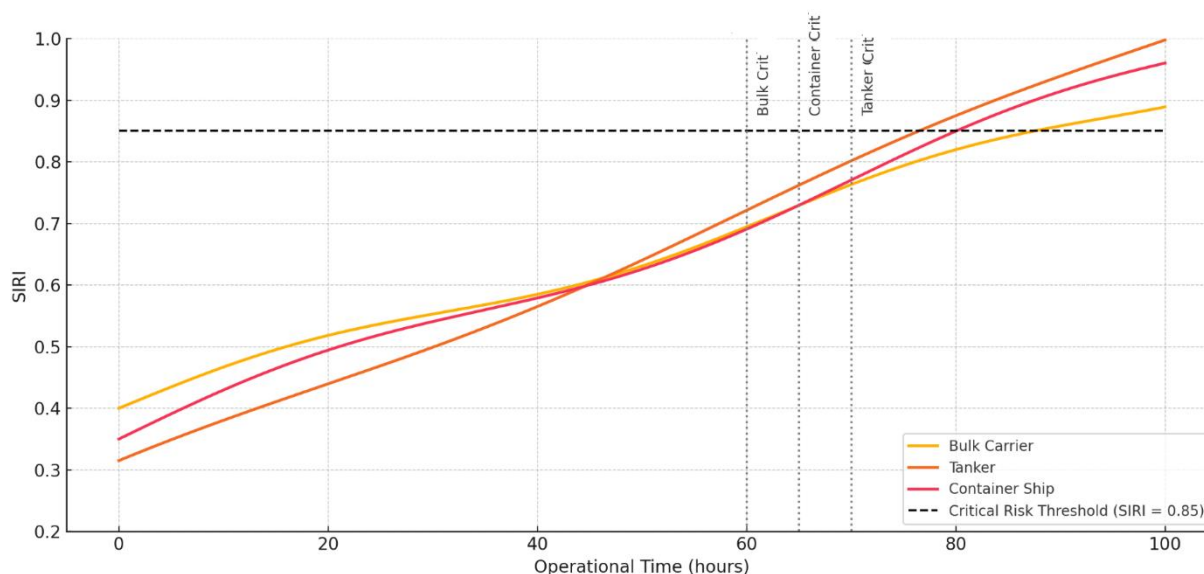


Fig. 2 – The dynamics of the *SIRI* for three types of vessels

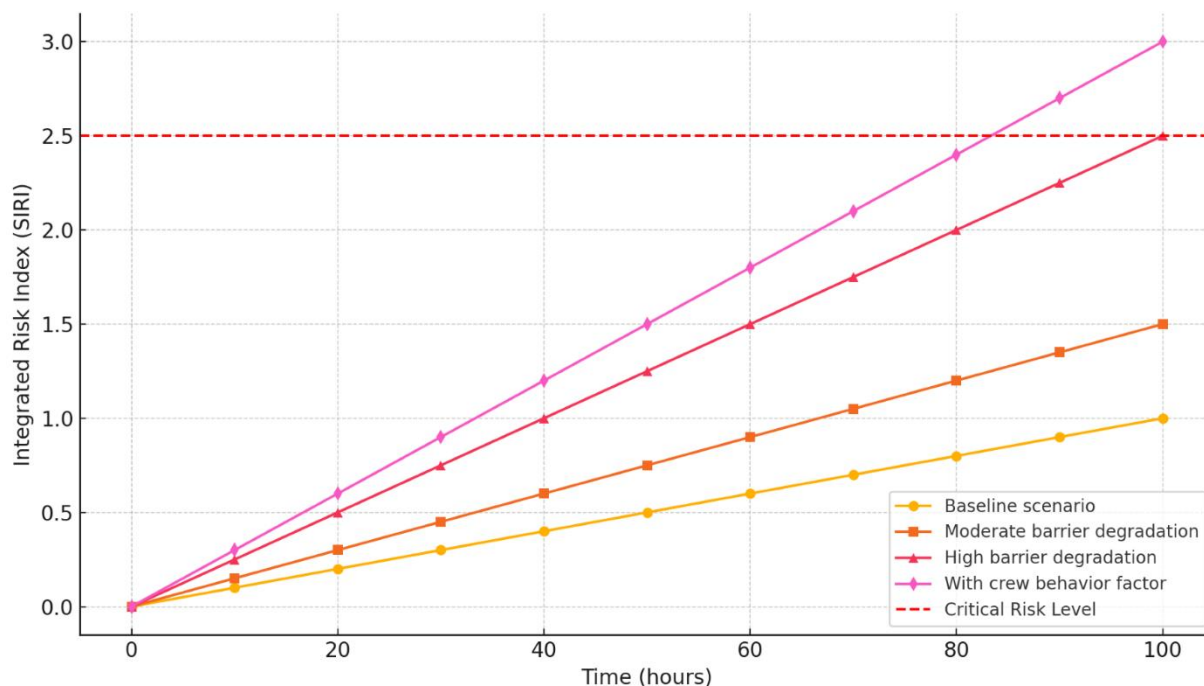


Fig. 3 – Dynamics of accumulation of the integrated risk index (SIRI) under different scenarios of degradation and crew behavior

The graph shows the dynamics of changes in the integrated risk index (SIRI) over time under four different scenarios: baseline, moderate and high degradation of safety barriers, as well as a scenario taking into account crew behavioral factors. The baseline scenario demonstrates a gradual increase in risk that does not exceed the critical limit within 100 hours, which indicates stable operation of systems and a sufficient margin of safety of the vessel in the absence of additional external or internal threats.

Moderate degradation of the barriers leads to an acceleration of risk growth, with the critical level almost reached at the end of the simulation. The scenario with high degradation demonstrates crossing the critical threshold after 70 hours, which indicates a reduction in response time in the event of technical failures. The most threatening scenario was the one with crew behavioral deviations: here, the risk index exceeds the critical level after 60 hours. This emphasizes that even with relatively good technical barriers, the human factor can significantly worsen the safety situation.

Thus, the results of the graphical modeling show that a combination of technical degradation and behavioral risks poses the greatest danger. This approach allows us to reasonably predict risks and implement adaptive control and response measures in a timely manner, which is especially important for complex and dynamic maritime conditions.

Conclusions

The article proposes a new integrated model for managing the operational safety of ships, which, for the first time, comprehensively takes into account not only the technical condition and degradation of safety systems but also the behavioral factors of the crew. The model is based on a probabilistic approach using the Safety Integrated Risk Index (SIRI), safety margin, and predicted time to critical condition. Machine learning tools (in particular, *LSTM*) are involved, which makes it possible to predict threats in real time.

The uniqueness of the proposed approach lies in modeling the psychophysiological state of crew members as a separate factor affecting the rate of degradation of technical barriers. This consideration of the behavioral component allows for detecting threatening situations much earlier, which increases the efficiency of risk management, especially in conditions of high uncertainty and autonomous navigation. By simulating various scenarios (power loss, changes in crew status, combined risks, etc.), the model's ability to early diagnose and adapt the actions of the crew or automated control systems was confirmed.

The practical value of the work lies in the possibility of implementing the developed model in digital maritime safety platforms for real-time monitoring, generating recommendations for altering the route, speed, or loading of the vessel. The model's modularity, scalability, and adaptive structure render it suitable for a wide range of ships and constitute a significant contribution to the development of proactive maritime safety management.

References

- [1] M. Zhang, P. Kujala, and S. Hirdaris, "A machine learning method for the evaluation of ship grounding risk in real operational conditions," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 226, article 108697, 2022. doi: **10.1016/j.ress.2022.108697**.
- [2] M. Zhang, H. Wang, F. Conti, T. Manderbacka, H. Remes, and S. Hirdaris, "A hybrid deep learning method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 145, article 110158, 2025. doi: **10.1016/j.engappai.2025.110158**.
- [3] M. Zhang, P. Kujala, M. Musharraf, J. Zhang, and S. Hirdaris, "A machine learning method for the prediction of ship motion trajectories in real operational conditions," *Ocean Engineering*, vol. 283, article 114905, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.114905**.
- [4] W. Deng, X. Ma, and W. Qiao, "A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 243, article 109884, 2024. doi: **10.1016/j.ress.2023.109884**.
- [5] W. Deng, X. Ma, and W. Qiao, "Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 139, article 104581, 2025. doi: **10.1016/j.trd.2024.104581**.
- [6] G. Bulian, and A. Francescutto, "Level 1 vulnerability criterion for the dead ship condition: A practical methodology for embedding operational limitations," *Ocean Engineering*, vol. 272, article 113868, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.113868**.
- [7] F. Mauro, and D. Vassalos, "The effect of the operational environment on the survivability of passenger ships," *Ocean Engineering*, vol. 281, article 114786, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.114786**.
- [8] R. Miratsu, K. Sasmal, T. Kodaira, T. Fukui, T. Zhu, and T. Waseda, "Evaluation of ship operational effect based on long-term encountered sea states using wave hindcast combined with storm avoidance model," *Marine Structures*, vol. 86, article 103293, 2022. doi: **10.1016/j.marstruc.2022.103293**.
- [9] N. Karimi, E. Javanmardi, A. Nadaffard, and F. Facchini, "Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach," *Ocean & Coastal Management*, vol. 263, article 107620, 2025. doi: **10.1016/j.ocecoaman.2025.107620**.
- [10] A. Wu et al., "RouteView 2.0: A real-time operational planning system for vessels on the Arctic Northeast Passage," *Environmental Modelling & Software*, article 106464, 2025. doi: **10.1016/j.envsoft.2025.106464**.
- [11] I. Kurt, and M. Aymelek, "Operational adaptation of ports with maritime autonomous surface ships. Transport Policy," vol. 145, pp. 1-10, 2023. doi: **10.1016/j.tranpol.2023.09.023**.
- [12] X. Zhou et al., "A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems," *Ocean Engineering*, vol. 327, article 121000, 2025. doi: **10.1016/j.oceaneng.2025.121000**.
- [13] V.N. Nguyen, N. Chung, G. Balaji, K. Rudzki, and A.T. Hoang, "Internet of things-driven approach integrated with explainable machine learning models for ship fuel consumption prediction," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 118, pp. 664-680, 2025. doi: **10.1016/j.aej.2025.01.067**.
- [14] Y. Sang, Y. Ding, J. Xu, and C. Sui, "Ship voyage optimization based on fuel consumption under various operational conditions," *Fuel*, vol. 352, article 129086, 2023. doi: **10.1016/j.fuel.2023.129086**.
- [15] A. Fan et al., "Data-driven ship typical operational conditions: A benchmark tool for assessing ship emissions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 483, article 144252, 2024. doi: **10.1016/j.jclepro.2024.144252**.
- [16] X. Jiang, Z. Xu, Y. Xie, H. Wang, H. Yuan, and J. Qin, "Modeling and operational analysis of ship integrated energy system considering partial-load characteristics of equipment and transferable loads," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 42, article 101651, 2025. doi: **10.1016/j.segan.2025.101651**.
- [17] M. Aydin, S.I. Sezer, S.S. Arici, and E. Akyuz, "Predicting human reliability for emergency fire pump operational process on tanker ships utilising fuzzy Bayesian Network CREAM modelling," *Ocean Engineering*, vol. 314, article 119717, 2024. doi: **10.1016/j.oceaneng.2024.119717**.
- [18] D.W. Russell, R. Lance, and P.J. Rosopa, "Operational safety risk modeling in a naval organization," *Journal of Safety Research*, vol. 93, pp. 274-281, 2025. doi: **10.1016/j.jsr.2025.02.025**.
- [19] H. Mochizuki, "Summary of researches on operational characteristics and safety of molten salt fast reactors based on neutronics and thermal-hydraulics coupling analysis," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 435, article 113941, 2025. doi: **10.1016/j.nuceng-des.2025.113941**.
- [20] R. Costas, A. Figuero, E. Peña, J. Sande, and P. Rosa-Santos, "Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds," *Ocean Engineering*, vol. 247, article 110678, 2022. doi: **10.1016/j.oceaneng.2022.110678**.
- [21] W. Guo, X. Zhang, Y. Ge, and Y. Du, "Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 197, article 104046, 2025. doi: **10.1016/j.tre.2025.104046**.

- [22] O.M. Melnyk, and Yu.V. Bychkovsky, "Suchasna metodyka otsinky rivniu bezpeky sudna ta shliakhy yoho pidvyshchennia" ["Modern methods of ship safety level assessment and ways of its improvement"], *Rozvytok transportu – Transport development*, № 2(9), pp. 37-46, 2021. doi: 10.33082/td.2021.2-9.03.
- [23] O.M. Melnyk, and Yu.V. Bychkovsky, "Vrakhuvannia faktoru stresu u systemi zabezpechennia bezpeky moreplavstva" ["Stress factor in the system of the shipping safety"], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 32(71), № 4, pp. 260-264, 2021. doi: 10.32838/2663-5941/2021.4/39.
- [24] O. Melnyk, K. Koryakin, D.A. Burlachenko, "Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskikh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky" ["Review and prospects of modern ship heading indication systems for ensuring navigational safety"], *Naukovi visti Dailivskoho universytetu – Scientific news of Dahl university*, № 21, 2021. doi: 10.33216/2222-3428-2021-21-13.
- [25] O. Melnyk, S. Onyshchenko, O. Lohinov, V. Okulov, and I. Pulyaev, "Aktualni problemy morskoi bezpeky ta suchasni shliakhy zabezpechennia okhorony sudna" ["Actual problems of maritime safety and modern ways of ensuring the ship security"], *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of cities*, № 6(166), pp. 204-210, 2021. doi: 10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210. (Ukr.)

ІНТЕГРОВАНА МОДЕЛЬ ВРАХУВАННЯ ПОВЕДІНКОВИХ ФАКТОРІВ ЕКІПАЖУ В СИСТЕМІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНА

Никитюк П.В.	ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5905-3807 , e-mail: gilaevnyk@gmail.com ;
Мельник О.М.	д-р техн. наук, професор, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9228-8459 , e-mail: m.onmu@ukr.net ;
Корякін Г.С.	д-р філософії, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2388-645X , e-mail: egleonx@gmail.com ;
Щенявський Г.С.	ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7803-978X , e-mail: s.onmu@ukr.net

У статті представлено інтегровану математичну модель управління експлуатаційною безпекою морських суден, яка комплексно враховує як технічні аспекти деградації бар'єрів безпеки, так і поведінкові фактори екіпажу. Обґрунтовано необхідність переходу від суто технократичного підходу до оцінювання ризиків до мультифакторного аналізу, що відображає реальну динаміку впливів у складному середовищі під час виконання технологічних операцій на борту судна. Зокрема, увага зосереджена на тому, як психофізіологічний стан членів екіпажу (втома, емоційне вигорання, неуважність) може прискорювати деградацію технічних систем і призводити до передчасного досягнення критичних значень інтегрованого індексу ризику (SIRI). Модель побудовано на основі модульного підходу з можливістю адаптації до типу судна, характеру навігаційного переходу, типу вантажу, рівня автоматизації та зовнішніх умов. Розроблена система дозволяє не лише фіксувати поточний рівень ризику, але й здійснювати прогнозування майбутніх загроз з урахуванням змін у поведінці екіпажу та технічному стані. Для цього запропоновано використовувати інструменти машинного навчання, зокрема моделі на основі рекурентних нейромереж (типу LSTM), які навчаються на послідовностях параметрів стану судна. Окрему увагу приділено розробці сценаріїв реакції системи на критичні ситуації, а також обґрунтовано можливість інтеграції моделі у інтелектуальні навігаційно-діагностичні комплекси. Проведені експерименти та сценарний аналіз підтверджують високу ефективність моделі у прогнозуванні розвитку аварійних ситуацій, зменшенні часу реагування та зниженні імовірності негативних наслідків. Запропонована модель є кроком до створення повнофункціональних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (DSS) для впровадження в практику судноплавства нового покоління, де управління ризиками здійснюється в реальному часі з урахуванням як технічних, так і людських чинників.

Ключові слова: експлуатаційна безпека, морський транспорт, морські перевезення, інтегрований індекс ризику (SIRI), поведінкова надійність екіпажу, деградація систем, моніторинг стану, безпека судноводіння, машинне навчання, нейромережі, прогнозування аварій, ризик-менеджмент, адаптивні системи, ситуаційна обізнаність, превентивний контроль, критичний стан, сценарний аналіз, навігаційні фактори.

Перелік використаних джерел

- [1] Zhang M., Kujala P., Hirdaris S. A machine learning method for the evaluation of ship grounding risk in real operational conditions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 226. Article 108697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108697>.
- [2] A hybrid deep learning method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions / M. Zhang et al. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 145. Article 110158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110158>.
- [3] A machine learning method for the prediction of ship motion trajectories in real operational conditions / M. Zhang et al. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 283. Article 114905. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114905>.
- [4] Deng W., Ma X., Qiao W. A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 243. Article 109884. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109884>.
- [5] Deng W., Ma X., Qiao W. Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. Vol. 139. Article 104581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104581>.
- [6] Bulian G., Francescutto A. Level 1 vulnerability criterion for the dead ship condition: A practical methodology for embedding operational limitations. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 272. Article 113868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113868>.
- [7] Mauro F., Vassalos D. The effect of the operational environment on the survivability of passenger ships. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 281. Article 114786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114786>.
- [8] Evaluation of ship operational effect based on long-term encountered sea states using wave hindcast combined with storm avoidance model / R. Miratsu et al. *Marine Structures*. 2022. Vol. 86. Article 103293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103293>.
- [9] Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach / Karimi N., Javanmardi E., Nadaffard A., Facchini F. *Ocean & Coastal Management*. 2025. Vol. 263. Article 107620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107620>.
- [10] RouteView 2.0: A Real-time Operational Planning System for Vessels on the Arctic Northeast Passage / A. Wu et al. *Environmental Modelling & Software*. 2025. Article 106464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106464>.
- [11] Kurt I., Aymelek M. Operational adaptation of ports with maritime autonomous surface ships. *Transport Policy*. 2023. Vol. 145. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.09.023>.
- [12] A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems / X. Zhou et al. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 327. Article 121000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121000>.
- [13] Internet of things-driven approach integrated with explainable machine learning models for ship fuel consumption prediction / V.N. Nguyen et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 118. Pp. 664-680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.01.067>.
- [14] Ship voyage optimization based on fuel consumption under various operational conditions / Sang Y., Ding Y., Xu J., Sui C. *Fuel*. 2023. Vol. 352. Article 129086. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129086>.
- [15] Data-driven ship typical operational conditions: A benchmark tool for assessing ship emissions / A. Fan et al. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 483. Article 144252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144252>.
- [16] Modeling and operational analysis of ship integrated energy system considering partial-load characteristics of equipment and transferable loads / X. Jiang et al. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2025. Vol. 42. Article 101651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101651>.
- [17] Predicting human reliability for emergency fire pump operational process on tanker ships utilising fuzzy Bayesian Network CREAM modelling / Aydin M., Sezer S. I., Arici S. S., Akyuz E. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 314. Article 119717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119717>.
- [18] Russell D. W., Lance R., Rosopa P. J. Operational safety risk modeling in a naval organization. *Journal of Safety Research*. 2025. Vol. 93. Pp. 274-281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2025.02.025>.
- [19] Mochizuki H. Summary of researches on operational characteristics and safety of molten salt fast reactors based on neutronics and thermal-hydraulics coupling analysis. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 435. Article 113941. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113941>.
- [20] Figuero A., Peña E., Sande J., Rosa-Santos P. Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds / R. Costas et al. / *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 247. Article 110678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110678>.
- [21] Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport / Guo W., Zhang X., Ge Y., Du Y. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*.

2025. Vol. 197. Article 104046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104046>.
- [22] Мельник О. М., Бичковський Ю. В. Сучасна методика оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення. *Розвиток транспорту*. 2021. № 2(9). С. 37-46. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.03>.
- [23] Мельник О. М., Бичковський Ю. В. Врахування фактору стресу у системі забезпечення безпеки мореплавства. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32(71), № 4. С. 260-264. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/39>.
- [24] Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських суднах для забезпечення навігаційної безпеки / Мельник О. М., Щербина О. В., Корякін К. С., Бурлаченко Д. А. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2021. № 21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-13>.
- [25] Актуальні проблеми морської безпеки та сучасні шляхи забезпечення охорони судна / О. М. Мельник та ін. *Комуніальне господарство міст*. 2021. № 6(166). С. 204-210. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210>.
- Стаття надійшла 21.06.2025
Стаття прийнята 18.07.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: An integrated model of crew behavior factors incorporation into the ship's safety system / Nykytyuk P., Melnyk O., Koryakin K., Shchenyavskiy G. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 240-249. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344960>.

ДОСЛІДЖЕННЯ МІНЛИВОСТІ «МУСОННОЇ ДЕПРЕСІЇ» У БЕНГАЛЬСЬКІЙ ЗАТОЦІ

Томчаковський Г.Г.*ст. викладач, аспірант, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>, e-mail: gтомchakovsky@gmail.com;***Капочкіна М.Б.***канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4893-2523>, e-mail: kapochkinamargarita@gmail.com;***Калініченко Є.В.***канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com*

Мусонні депресії (МД), як області зниженого тиску, що формуються над акваторією Бенгальської затоки, мають значний вплив на погодні умови в період літнього мусону. Вони характеризуються штормовим вітром, високими хвилями, інтенсивною хмарністю і сильними дощами, становлячи небезпеку для морського судноплавства та берегової інфраструктури в регіоні. Часова мінливість МД характеризується істотними змінами у широкому діапазоні масштабів – від між річного до внутрішньомісячного. Розуміння причин, що контролюють мінливість режиму МД, необхідне для зниження ризиків і втрат у секторі морського транспорту, що відіграє ключову роль в світовій економіці. Досліджено МД Біскайської затоки двох типів, у тому числі з радіусом до 2 тис. км. Показано, що обидва типи МД за сприятливих умов однаково трансформуються у тропічний циклон. Визначено, що утворення МД у Біскайській затоці не сприяють сталому розвитку літньої мусонної циркуляції. Визначено, що утворення МД під час літнього мусону є типовим лише для Біскайської затоки. Така відмінність пов'язана з особливими умовами у привідній атмосфері, що виникають завдяки конвекційній нестійкості над розпрісненими зонами океану в дельтах річок. Вперше встановлено, що МД у Біскайській затоці утворюються циклічно, тобто під впливом певних умов. Час утворення МД співпадає з тимчасовим зменшенням відцентрової сили в умовах зменшення кутової швидкості обертання Землі навколо своєї вісі. Це підтверджено фактом припинення циклічного утворення МД у Біскайській затоці під час локального зростання кутової швидкості обертання Землі в умовах літнього сонцестояння. Отримані результати створюють основу для поліпшення якості прогнозів погодних умов на морських шляхах у північній частині Індійського океану та оптимізації стратегій мінімізації погодних ризиків для морської галузі.

Ключові слова: мусонна депресія, мусонний клімат, судноплавство, внутрішньотропічна зона конвергенції, морська навігація, солоність океану.

Постановка проблеми

Мусонні депресії (МД) над акваторією Бенгальської затоки – характерний елемент літньої мусонної циркуляції атмосфери регіонального масштабу. МД супроводжуються штормовими вітрами і високими хвилями, що створює загрозу для безпеки морського судноплавства на шляхах, що зв'язують порти Індії, Бангладеш, М'янми і Шрі-Ланки. Траєкторії МД проходять через основні судноплавні шляхи, тому інформація про їхнє переміщення та інтенсивність критично важлива для планування маршрутів і термінів морських перевезень.

Повторюваність МД у часі схильна до значних між річних коливань. В окремі роки над Бенгальською затокою може формуватися до 10-12 МД за сезон, тоді як в інші роки їхня кількість скорочується до 1-2. Крім цього, частота МД зазнає помітних змін у масштабі десятиліть. Так, в останній чверті XX століття відзначалася тенденція до зменшення кількості МД [1], а на початку XXI століття фіксується активізація МД (до 7-8 МД за сезон [2]).

До числа основних предикторів МД над Бенгальською затокою відносяться температура поверхні океану, відносна завихоренність і збіжність потоків у нижній тропосфері, величина вертикального зсуву вітру і

запаси прихованого тепла в атмосфері [3, 4]. Інші дослідження вказують на тісний зв'язок формування МД із коливаннями інтенсивності та зсувами внутрішньотропічної зони конвергенції (ВЗК) [5]. Так, активізація ВЗК та її поширення на північ від середнього літнього положення зазвичай супроводжуються збільшенням кількості випадків циклогенезу і посиленням вітрохвильової активності над акваторією Бенгальської затоки. І навпаки, ослаблення ВЗК призводить до зменшення повторюваності МД і поліпшення погодних умов для судноплавства.

Кількісна оцінка факторів, що визначають мінливість мусонних депресій на різних часових масштабах, видається надзвичайно важливою в контексті їхнього впливу на погодні ризики для морського транспорту в Бенгальській затоці. Бенгальська затока і прилеглі райони Індійського океану відрізняються високою інтенсивністю судноплавства. Порти Індії, Бангладеш і Шрі-Ланки обробляють понад 1 млн TEU (20-футових контейнерних еквівалентів) на рік. На морський транспорт припадає близько 95% обсягу зовнішньої торгівлі Індії. У зв'язку з цим аномалії вітрохвильової активності та видимості, пов'язані з проходженням МД, можуть призводити до серйозних порушень у роботі портів і затримок у морських перевезеннях. Щорічні

економічні втрати через несприятливі погодні умови для світового судноплавства оцінюються в 0,1-0,2% глобального ВВП. Для регіону Індійського океану цей показник може бути істотно вищим з урахуванням високої повторюваності МД. Більш чітке розуміння предикторів циклогенезу над Бенгальською затокою може сприяти підвищенню точності та завчасності прогнозів переміщення МД і поліпшенню логістики у регіоні. Це, своєю чергою, дасть змогу зменшити економічні втрати та ризики для морського транспорту, пов'язані з впливом небезпечних погодних явищ.

Мета статті

Метою даної роботи є визначення чинників, що визначають мінливість мусонних депресій на між річному і внутрішньо місячному часових масштабах. У Індоеокеанському регіоні зазвичай наприкінці квітня – на початку травня приземна температура досягає річного максимуму (перевищує 40°C); при цьому температура поверхні моря (SST) перевищує 30°C на більшій частині північної частини Індійського океану. Так триває до червня. З початком літнього мусону південно-західні вітри приносять у прибережні райони насичене вологою повітря та сильні дощі.

Загальновідомо, що мусонний клімат Бенгальської затоки відрізняється від мусонного клімату Аравійського моря за рахунок того, що у Бенгальській затоці річковий стік суттєво вищий, ніж у Аравійському морі (рис. 1).

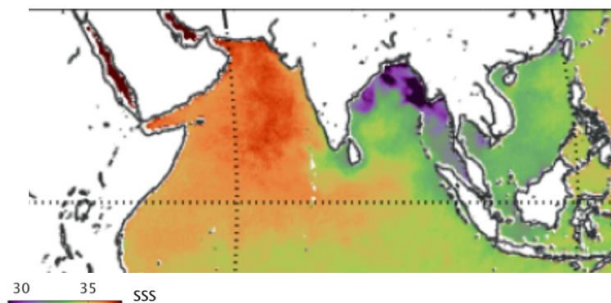


Рис. 1 – Карта-схема солоності поверхневих вод Індійського океану [6]

У північно-центральної частині Бенгальської затоки значна кількість прісної води з опадів і річок створює неглибокий поверхневий шар води з низькою солоністю [7, 8], який перекриває під поверхневі теплі та солоні води [9-11]. Солоність поверхневого шару Бенгальської затоки іноді може бути нижчою на 25% [12], що значно підвищує випаровування з поверхні океану, зменшує вагу приводного повітря і, відповідно, зменшує атмосферний тиск над акваторією.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Мусонна депресія – один із ключових елементів літньої мусонної циркуляції над Бенгальською

затокою у Індійському океані. На рис. 2 показано траєкторії руху МД та циклонів у червні-вересні у 1980-2009 роках.

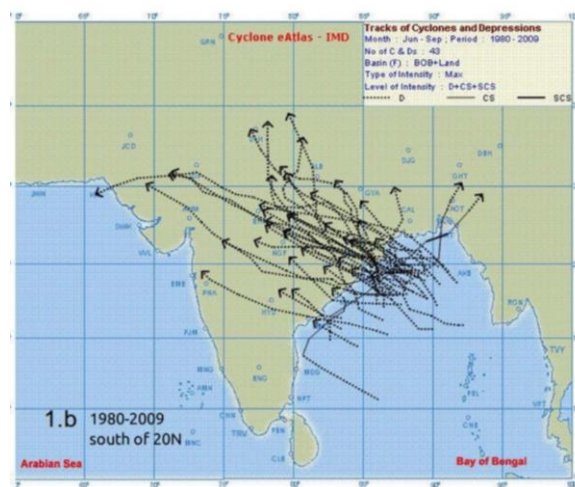


Рис. 2 – Треки мусонних депресій з електронного атласу циклонів IMD, що датуються періодом 1980-2009 років. Цифри та відповідна статистика були отримані за допомогою онлайн-атласу циклонів Індійського метеорологічного департаменту [13]

Важливо констатувати, що у розумінні авторів публікації [13] МД – це локальні конвективні комірки, з яких іноді, за певних умов, формуються тропічні циклони. Виникнувши над теплими водами Бенгальської затоки МД такого типу заповнюються над Індійським субконтинентом. Тривалість життєвого циклу типової МД становить від 3 до 6 діб [14]. Слід зазначити, що тропічні циклони Бенгальської затоки мають типові траєкторії, що відповідають схемі, наведеній на карті (рис. 2). У період літнього мусону над Аравійським морем та (у меншій мірі) над Бенгальською затокою спостерігається вертикальний зсув вітру, що перешкоджає утворенню тропічних циклонів [15].

У нашому розумінні МД – це синоптичні утворення в нижній тропосфері з характерними горизонтальними розмірами до 2000 км. Зародження МД над водами Бенгальської затоки відбувається за поєднання низки сприятливих чинників, до яких відносять позитивні аномалії температури поверхні океану, підвищений вологовміст повітря.

Розвиток і підтримання МД протягом кількох днів над водами Бенгальської затоки пов'язують з бароклінно-баротропною нестійкістю і умовною нестійкістю 2-го роду [16]. Вертикальна структура МД характеризується наявністю холодного ядра на нижніх рівнях тропосфери і теплового ядра на верхніх рівнях (500 – 300 гПа). Висхідні рухи в циркуляції МД зазвичай простежуються до рівня 300 гПа [4]. Характерне значення добових опадів, пов'язаних із МД, становить 30-50 см. Просторовий розподіл опадів, пов'язаних з МД, дуже неоднорідний [17]. На рис. 3 наведено карту середньої

щодобової кількості опадів у період літнього мусону [18].

На схемі показано, що просторове положення районів аномальних опадів у Бенгальській затоці не відповідає траєкторії руху МД, наведеної на рис. 2, і співпадає з районом максимального випаровування над розпіненими поверхневими водами на північному сході Бенгальської затоки (рис. 1). Найголовнішим є те, що як у Бенгальській затоці, так і у Аравійському морі райони максимальних опадів співпадають з виходом на суходіл літнього мусонного вітру південно-західного напрямку.

Розглянемо між річну мінливість МД [18]. На рис. 4 показано зміни у часі інтенсивності МД за різними ознаками.

Приблизно у 1980 році активність МД системно знизилася. Після цього активізація МД зафіксована у 1996-1997 роках та у 2005-2007 роках.

В роботах [19, 20] розглянуто внутрішню місячну мінливість МД над акваторією Бенгальської затоки, вказано на вплив процесів, що формують внутрішньотропічну конвергенцію на інтенсивність МД. Частота формування та інтенсифікації МД схильні до значних внутрішньомісячних коливань, проявлених зміною активних і перервних фаз літнього мусону над Індією.

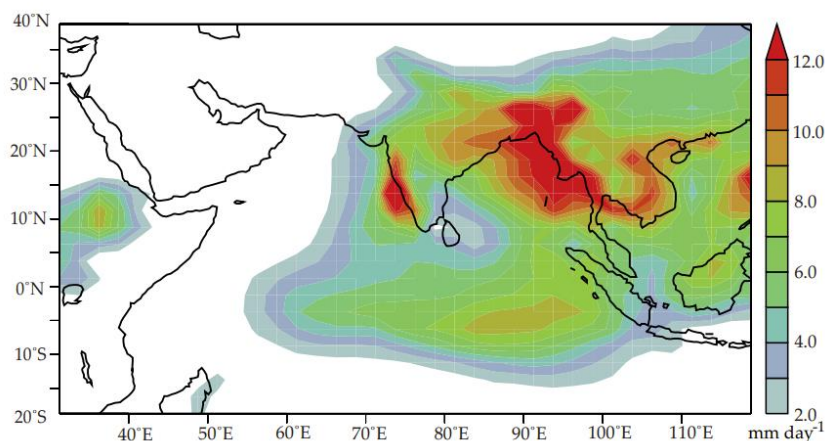


Рис. 3 – Середня кількість опадів (мм/день) у період літнього мусону (червень-вересень) [18]

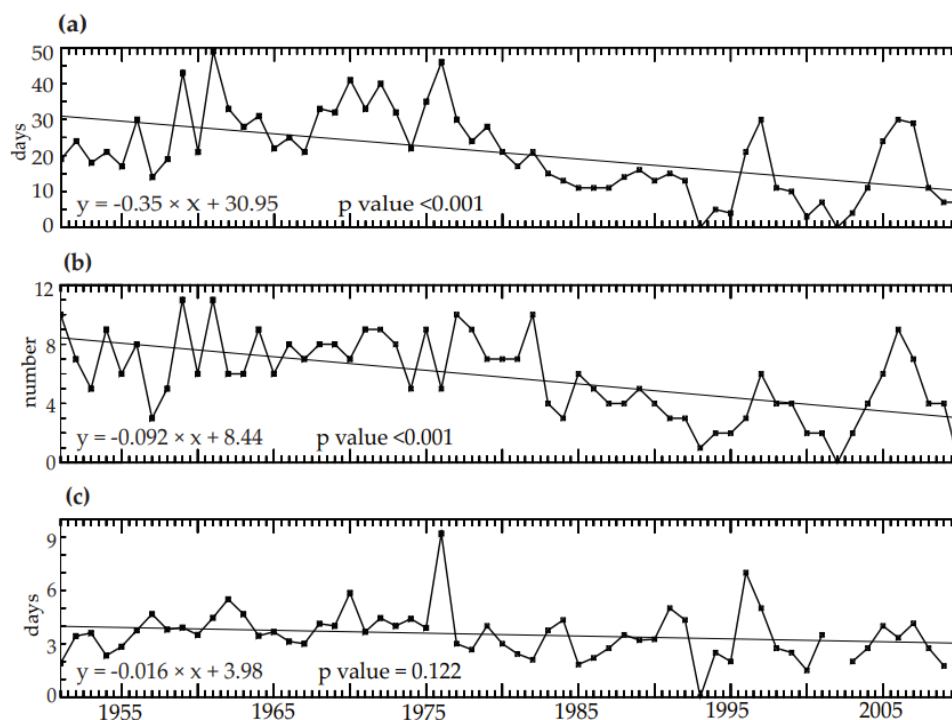


Рис. 4 – Статистичні дані річної кількості МД: (а) кількості днів, (б) кількості, (с) середньої тривалості життя (у днях) [18]

Виклад основного матеріалу

В результаті узагальнення результатів дослідження процесів утворення МД у Бенгальській затоці було визначено, що 2018 рік виявився аномальним за чисельністю МД (6 одиниць) та тропічних циклонів (ТЦ) (7 одиниць) [21]. У 2018 році, в термін дії літнього мусону, тропічні депресії були зафіксовані 28 травня, 10 червня, 20 липня, 7, 15 серпня, 6 вересня. Всі МД мали локальний просторовий масштаб і сформувалися над розпрісненими прибережними водами північного узбережжя Бенгальської затоки. Кліматичні особливості тропічного циклогенезу в умовах мусонного клімату нами розглянуті у монографії [22].

На рис. 5 наведено графік утворення тропічних циклонів, які мають відповідну назву, і МД (тропічних депресій), що ідентифікуються аббревіатурою BOB і

відповідним номером. На рисунку показано, що наприкінці травня, коли температура морської поверхні перевищила 30 градусів, а мусонний вертикальний зсув вітру ще не розвинувся, з МД утворилися ТЦ «Сангар» та «Макуну». У подальшому, за появи вертикального зсуву вітру, у Бенгальській затоці утворилося 6 депресій, що нетипово для району мусонної циркуляції у Аравійському морі. Як тільки мусонна циркуляція припинилася, у Бенгальській затоці з МД почали утворюватися ТЦ «Дайє», «Лубан» та «Тітлі». Навіть в листопаді та грудні 2018 р. у Бенгальській затоці утворилися ТЦ «Гаджа» та «Петай».

На рис. 6 наведено карти-схеми тропічних депресій у Індоканському регіоні під час літнього мусону у 2018 році: а) 29.05.2018; б) 10.06.2018; в) 21.07.2018; г) 07.08.2018; д) 15.08.2018; е) 06.09.2018 [21].

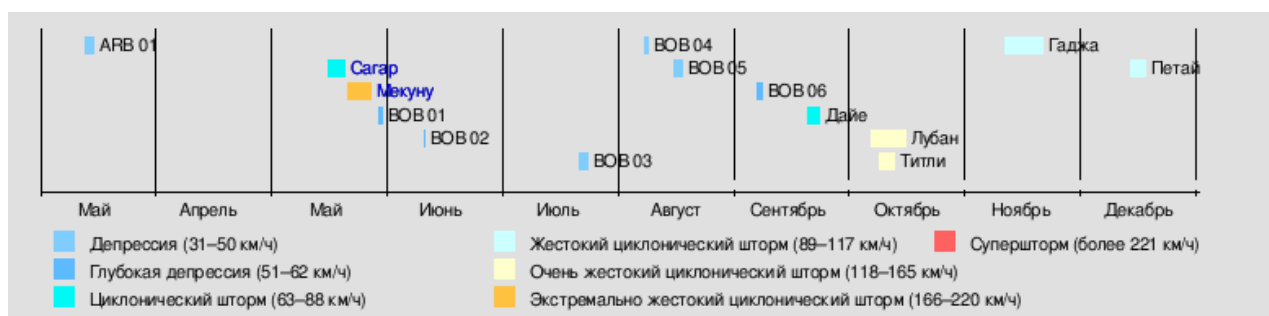


Рис. 5 – Схема-графік тропічного циклогенезу у Індоканському регіоні у 2018 році [21]

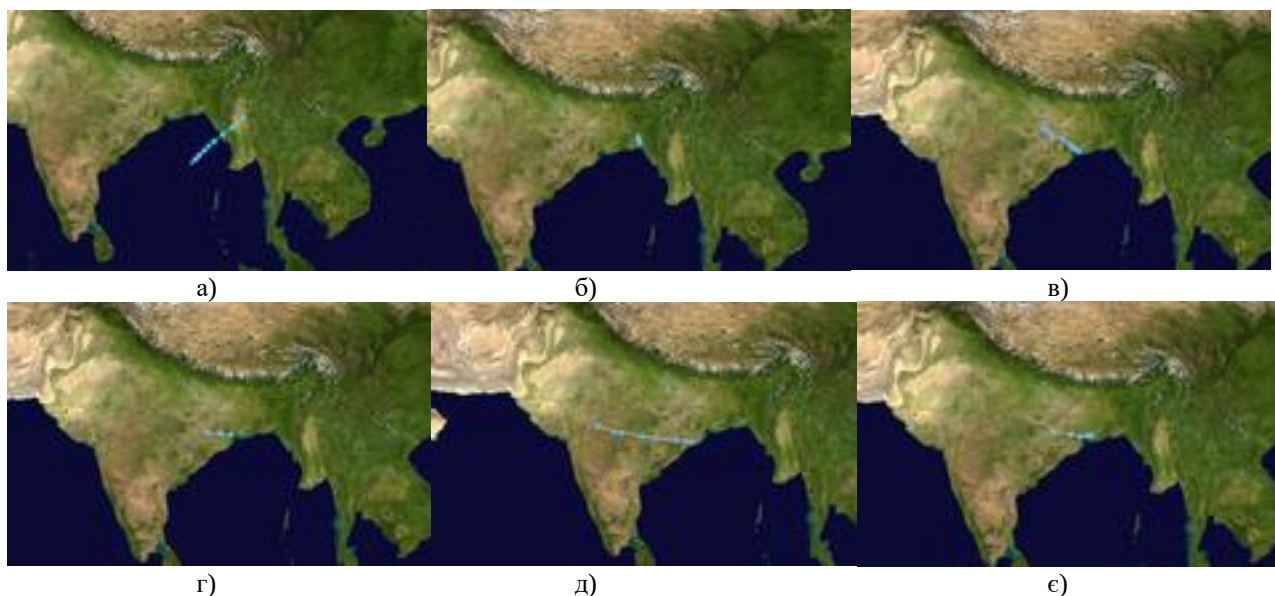


Рис. 6 – Карты - схемы тропічних депресій у Індоканському регіоні під час літнього мусону у 2018 році а) 29.05.2018 б) 10.06.2018 в) 21.07.2018 г) 07.08.2018 д) 15.08.2018 е) 06.09.2018 [21]

Важливо констатувати, що всі шість тропічних депресій виникли в розпрісненому районі Бенгальської затоки, де формується зона позитивної аномалії потенційної енергії конвекції в тропосфері. Характеристики депресій BOB01- BOB06 наведені у таблиці.

Таблиця
Характеристики депресій BOB01- BOB06 [23]

Назва тропічної депресії	Дата утворення	Швидкість вітру (км/годину)	Атмосферний тиск гПа
BOB01	29.05.2018	55 км/ч	990 гПа
BOB02	10.06.2018	45 км/ч	989 гПа
BOB03	21.07.2018	45 км/ч	989 гПа
BOB04	07.08.2018	45 км/ч	992 гПа
BOB05	15.08.2018	45 км/ч	994 гПа
BOB06	06.09.2018	55 км/ч	990 гПа

Відповідно до результатів наших досліджень стосовно впливу щорічної аномалії кутової швидкості обертання Землі у червні-серпні на виникнення мусонної циркуляції у Аравійському морі, нами проведено аналогію з Бенгальською затокою. На рис. 7 наведено графік змін у часі кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі у травні-вересні 2018 р. (стрілками показано дати виникнення в Бенгальській затоці МД BOB01 - BOB06).

Відповідно до графіку, наведеного на рис. 7, час утворення тропічних депресій співпадає з умовами мінімальної швидкості обертання Землі навколо своєї осі. За час існування літнього мусону у 2018 році зафіксовано 6 тропічних депресій і 8 епізодів зниження кутової швидкості Землі. Важливо відмітити, що в умовах річного позитивного екстремума швидкості обертання Землі навколо своєї осі, тобто в період часу з середини червня по середину липня, МД в дати мінімальної швидкості обертання Землі навколо своєї осі, тобто 22 червня і 11 липня, не заформувалися. Отримані результати співпадають з результатами наших досліджень стосовно того, що за умов зменшення швидкості обертання Землі відбувається зменшення інтенсивності мусонної циркуляції і, відповідно, зменшення зсуву вітру по висоті.

Слід зауважити, що під терміном МД одночасно розуміють як локальні тропічні депресії, так і великомасштабні синоптичні циклонічні утворення діаметром майже 2000 км. Такі ТЦ зазвичай формуються в екваторіальній зоні і на кінцевій стадії часто трансформуються у звичайні ТЦ. Цей процес нами вперше було розглянуто у монографії [22], у тому числі екваторіальний циклон Бенгальської затоки діаметром порядку 2000 км 25.11.2011 р., який перетворився у тропічний шторм 05А (атмосферний тиск 998 гПа, швидкість вітру 55 км/годину). ТЦ був пов'язаний із сильними дощами, які спричинили 19 смертей та пошкодили 5700 будинків.

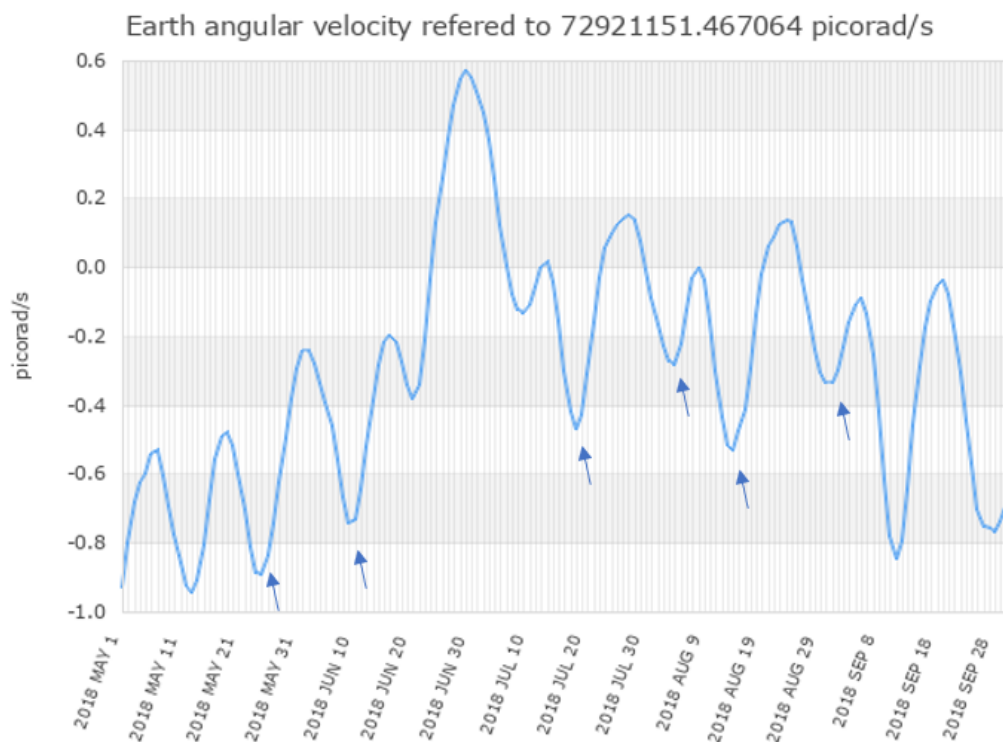
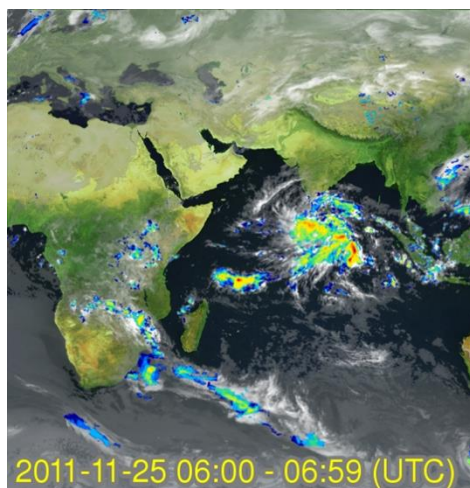
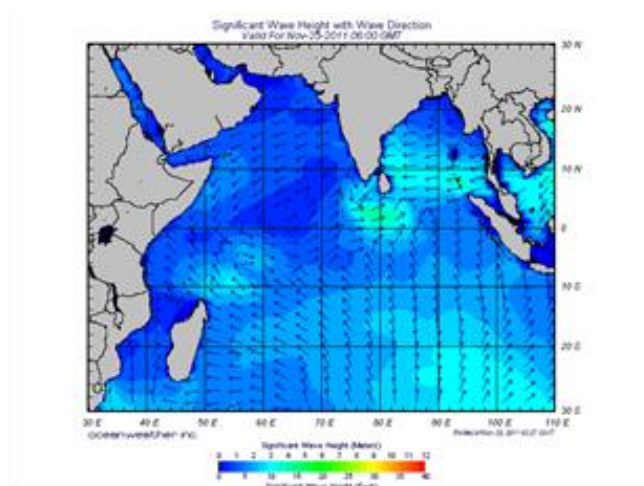


Рис. 7 – Графік змін у часі кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі у травні-вересні 2018 р. (стрілками показано дати виникнення в Бенгальській затоці тропічних депресій BOB01 - BOB06) [23]



а)



б)



в)

Рис. 8 – а) ІЧ та РЛ зображення циклону в Індійському океані 25.11.2011 р. [24] б) Карта: висоти і напрямку вітрових хвиль у Індійському океані 25.11.2011 р. о 9:00 за ГРН [25], в) фото тропічного шторму 27.11.2011 р.

На рисунку 8 показано, що в районі екватору в центрі МД за умов циклонічної циркуляції (проти часової стрілки) висота вітрових хвиль досягала 6-7 м. Завдяки тому, що з 6 по 20 червня 2018 року погодні умови у Бенгальській затоці були досліджені (програма MISO-BoB 2018) і опубліковані [26], ми виконали додаткові дослідження внутрішньо місячної мінливості літнього мусону у Індійському океані саме у червні 2018 р. за результатами емпіричних досліджень, виконаних за участю Індії, Шрі-Ланки та наукового підрозділу ВМС США за участю корабля R/V Thompson США, авторами дослідження [26] у Бенгальській затоці визначено часовий проміжок 9-12.06.2018 р., як прояв активного мусону, а 16-19.06.2018 р., як прояв тимчасового припинення мусонної циркуляції. На рис. 9 надано інформацію про атмосферні умови у приводному шарі затоки (температурні аномалії та вітрові умови під час активного мусону (9-12 червня) та під час тимчасового припинення мусонної циркуляції у Бенгальській затоці (16-19 червня)

(с) та (d), відповідно. Контурні лінії надають інформацію про район і інтенсивність опадів.

Відповідно до наведених карт, мусонна циркуляція у вигляді південно-західного вітру починається на початку червня, досягає потужності звичайного рівня 10 червня, а потім 16-19 червня з незрозумілих причин блокується. За рахунок блокування мусонної циркуляції у Бенгальській затоці тимчасово відновлюються пасатні вітри західного напрямку.

Розглянемо зміни у часі швидкості та напрямку вітру у центральній частині Бенгальської затоки 5-20 червня 2018 року (рис. 10).

На рис. 9 показано, що на висоті ізобари 600 гПа літній мусон характеризується швидкістю вітру приблизно 20 м/с, а у приводному шарі лише до 15 м/с. Під час блокування літнього мусону на висоті ізобари 600 гПа швидкість вітру знижується до 2-3 м/с і змінюється його напрямок, хоча у приводному шарі швидкість вітру залишається на рівні 7-8 м/с без суттєвої зміни напрямку.

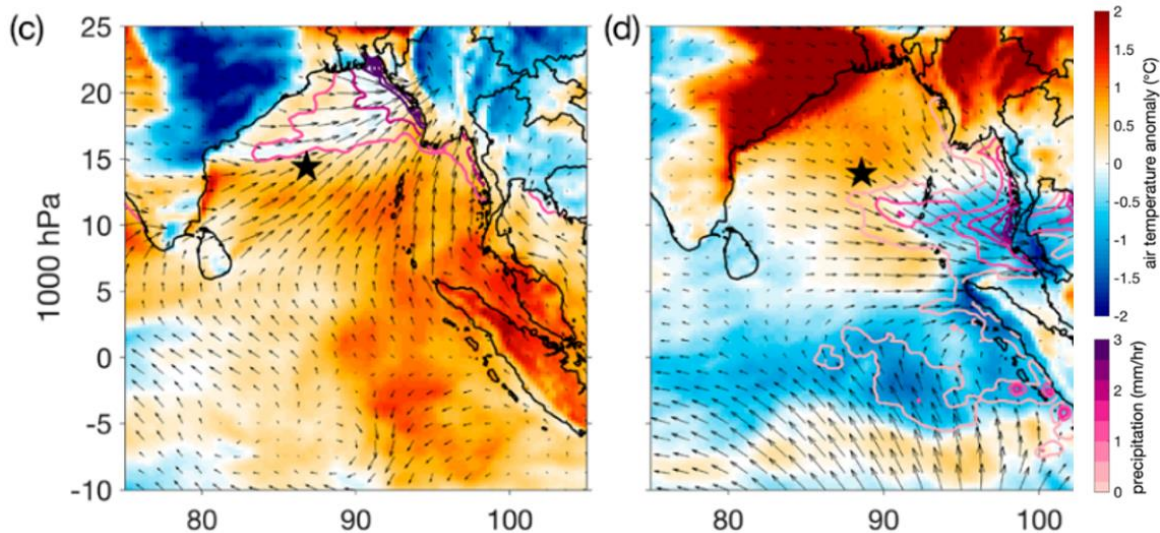


Рис. 9 – Атмосферні умови у приводному шарі затоки (температурні аномалії та вітрові умови під час активного мусону (9-12 червня) та під час тимчасового припинення мусонної циркуляції у Бенгальській затоці (16-19 червня), відповідно [26]

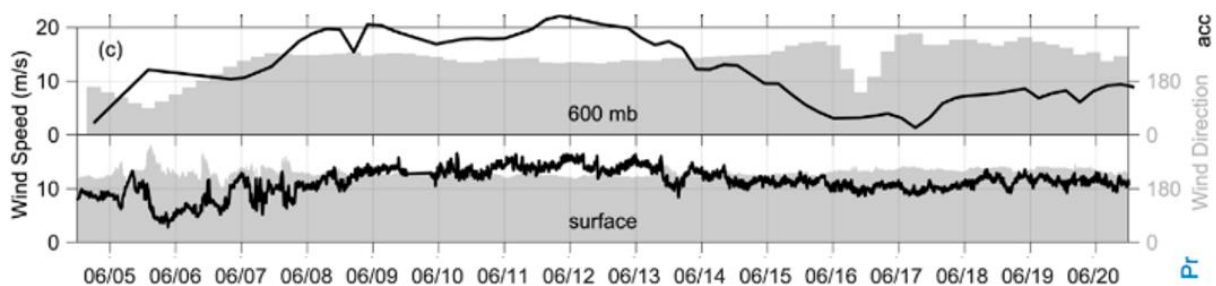


Рис. 10 – Часові зміни (с) швидкості вітру (чорний, LHS) і напрямку (сірий, RHS) (внизу) біля поверхні та (вгорі) на 600 гПа [26]

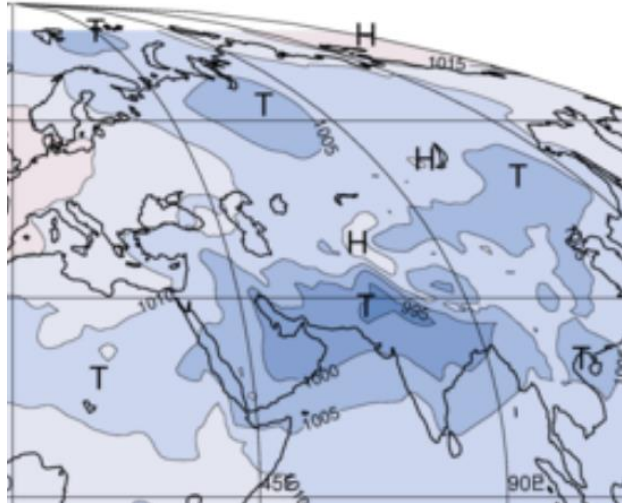
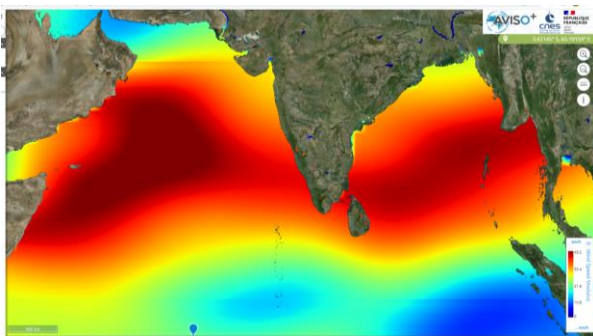
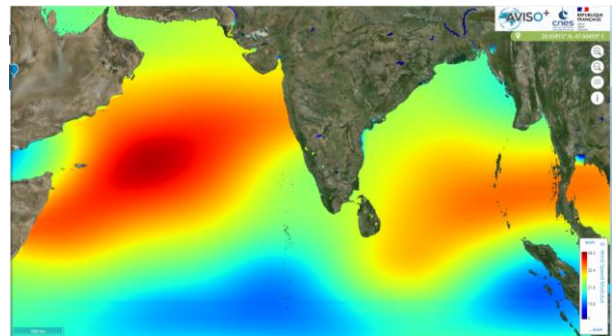


Рис. 11 – Фрагмент карти приземного атмосферного тиску в червні 2018 р. [27]



а)



б)

Рис. 12 – Карти швидкості вітру у Індокоеанському регіоні: а) 10.06.2018; б) 17.06.2018 р. [28]

Нами на рис. 11 наведено карту приземного атмосферного тиску, осередненого за червень 2018 року. За осередненими даними, у червні 2018 року над Біскайською затокою було зафіксовано малоградієнтне баричне поле, що має формувати південно-західний вітер, як це показано на рис. 4а. Можна відмітити, що градієнти атмосферного тиску у приводному шарі Біскайської затоки приблизно вдвічі менші, ніж у Аравійському морі. Важливою інформацією є і те, що в районі утворення тропічних депресій на півночі Бенгальської затоки, атмосферний тиск у приводному шарі був нижчий за 1000гПа, тобто в кордонах тропічних депресій ВОВ02-ВОВ06 від'ємна аномалія атмосферного тиску коливалася в межах 4-8 гПа.

Нами виконано порівняльний аналіз вітрових умов 10.06.2018 в Аравійському морі та у Бенгальській затоці, коли мусонний вітер був вже сформованим у фазу блокування літнього мусону 17.06.2018 р. (рис. 12).

На рис. 12 можна побачити, що мусонна циркуляція Індокоеанського регіону, як прояв у тропосфері

південно-західних вітрів, проявлена двома окремими, ізольованими один від одного, локалізованими в кордонах Аравійського моря та Бенгальської затоки зонами посилення швидкості вітру з екстремумами в центральних районах Аравійського моря та Біскайської затоки. Тобто, структури в тропічній тропосфері, що мають синоптичний масштаб, існують окремо в Аравійському морі та Біскайській затоці, хоча генеруються спільно загальним погодоутворюючим фактором, бо починаються і закінчуються синхронізовано, а за нашими спостереженнями активізуються і послаблюються – також синхронізовано.

Розглянемо розбіжності літнього мусону у Аравійському морі та Біскайській затоці.

На рисунках 13, 14 наведено інформацію стосовно часових змін максимальної швидкості вітру та максимальної висоти вітрових хвиль у Аравійському морі і Бенгальській затоці у червні 2018 року під час виконання наукової програми MISO-BoB 2018.

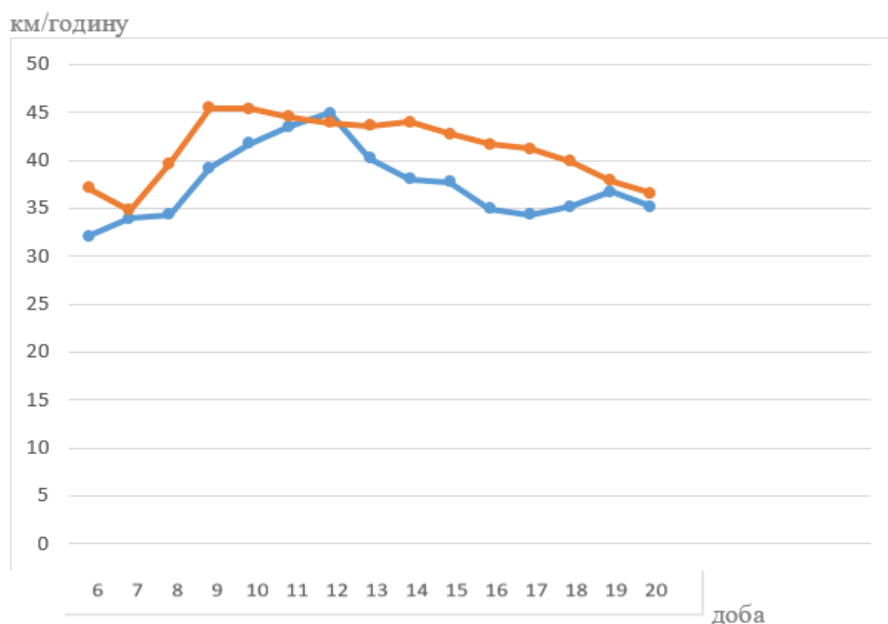


Рис. 13 – Зміни у часі максимальної швидкості вітру у Аравійському морі (помаранчевий) та Бенгальській затоці (синій).

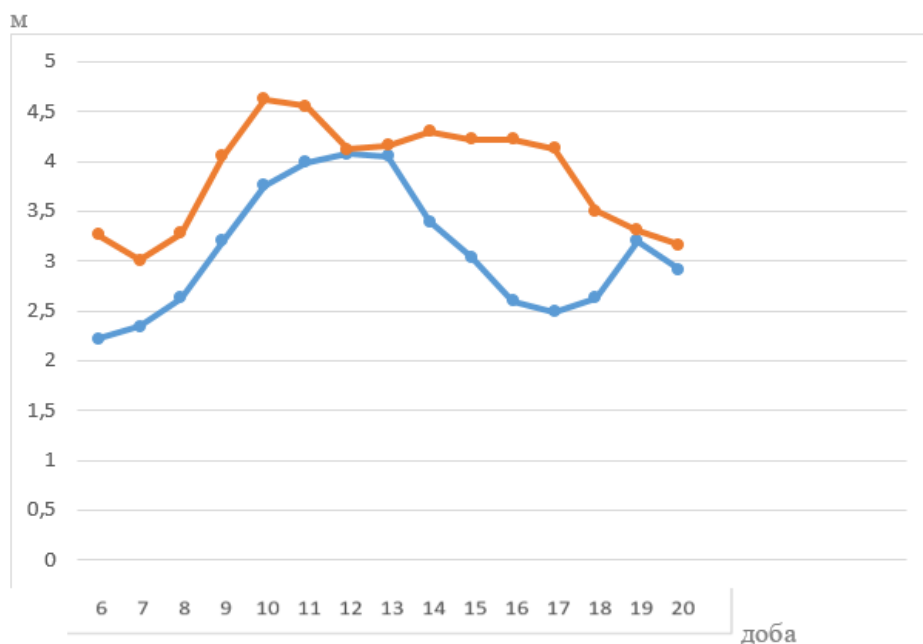


Рис. 14 – Зміни у часі максимальної висоти вітрових хвиль у Аравійському морі (помаранчевий) та Бенгальській затоці (синій)

За даними часових змін показника позитивного екстремуму швидкості вітру у Аравійському морі і Бенгальській затоці можна зробити висновок, що у Аравійському морі протягом всього часу цей показник приблизно на 5 км/годину вищий, ніж над Біскайською затокою, а дисперсія нижча. Це свідчить про те, що погоду утворюючі фактори, що епізодично блокують літній мусон, найбільш виражені у Біскайській затоці.

Можливо, з цієї причини термін «мусонна депресія» стосується синоптичних утворень саме Біскайської затоки.

Поверхнєве хвилювання, як більш надійний показник ефективності мусонної циркуляції, що фіксується супутниковими альтиметричними системами, факт відсутності кореляції між змінами інтенсивності мусонної циркуляції після початку дії вітрів, що зафіксовано

у першій декаді червня. За ознакою поверхневого хвилювання, у порівнянні з оцінкою швидкості вітру, активність літнього мусону у Аравійському морі у порівнянні з Біскайською затокою ще більша, бо висота хвиль більша на 1.0-1.5 м.

На рис. 15 наведено результати вимірювань, проведених у центральній частині Біскайської затоки під час виконання програми програма MISO-BoB 2018. Це тепловий потік сонячного випромінювання, температура поверхні океану, вертикальний розподіл

температури та солоності морської води. На графіках можна побачити, що 13 червня, у дату початку процесу блокування мусонної циркуляції у Бенгальській затоці, хмарність почала зменшуватися, хоча це більше підходить не для причини, а як наслідок процесу припинення мусонного вітру. У зазначену дату показник температури поверхневого шару води, як і води до глибини 40 м у центральній частині Бенгальської затоки, був без змін. Інша ситуація спостерігається у змінах солоності морської води.

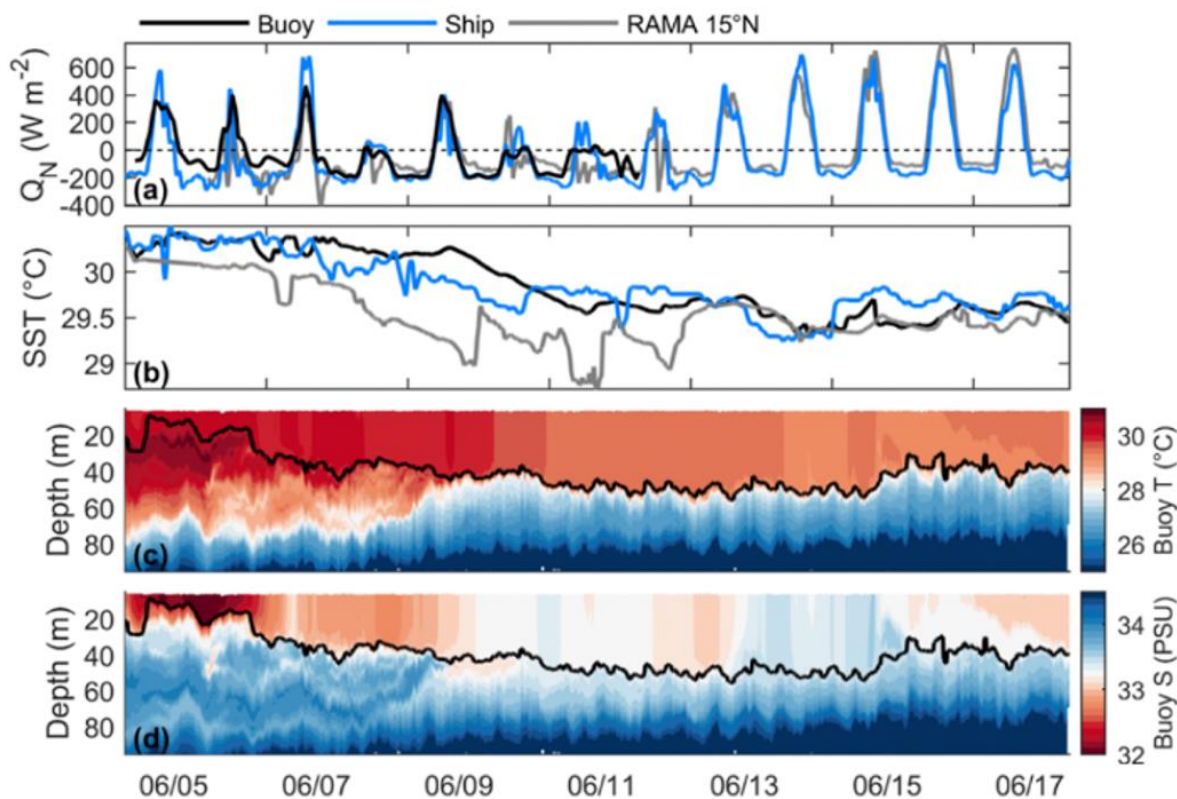


Рис. 15 – (a) тепловий потік Сонячного випромінювання і (b) Температура поверхні океану буй (чорний), корабель (синій) і причал RAMA 15°N (сірий) (c) вертикальний розподіл температури (буй) (d) вертикальний розподіл солоності (буй) [12]

Висновки

Проведене дослідження виявило низку важливих особливостей міжрічної мінливості мусонних депресій над акваторією Бенгальської затоки. Встановлено, що в останні десятиліття XX століття спостерігалася стійка тенденція до зменшення повторюваності МД, незважаючи на зростання температури поверхні океану в регіоні. Цей факт вказує на переважаючий вплив інших чинників, що не сприяють для формування та інтенсифікації МД.

Проаналізовано особливості внутрішньомісячної мінливості МД. Встановлено, що ослаблення ВЗК зазвичай супроводжується зменшенням повторюваності МД над Бенгальською затокою. Отримані результати сприятимуть підвищенню якості прогнозів несприятливих погодних умов на морських шляхах у

Бенгальській затоці Індійського океану, зниженню ризиків для морського транспорту та оптимізації стратегій планування логістики у регіоні.

Вперше звернуто увагу на відмінності в інтенсивності та стійкості мусонної циркуляції у Аравійському морі та Бенгальській затоці. В результаті виконаних досліджень можна сформулювати попередні висновки стосовно того, що аномальна солоність і Аравійському морі через зменшення випаровування з поверхні аравійського моря стримує конвекційні процеси, що підсилює мусонні вітри і зменшує вірогідність утворення МД і їх трансформацію у ТЦ.

Вперше звернуто увагу на те, що збільшення кутової швидкості обертання землі навколо своєї вісі сприятиме стійкості у часі мусонної циркуляції.

Перелік використаних джерел

- [1] Prajeesh A., Ashok K., Rao D. Falling monsoon depression frequency: A Gray-Sikka conditions perspective. *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3. Article 2989. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep02989>.
- [2] On The Decreasing Trend of Monsoon Depressions over Bay of Bengal / Vishnu S., Francis P.A., Sheno S.S.C., Ramakrishna S.S.V.S. *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11, № 1. Article 014011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014011>.
- [3] Sørland S.L., Sorteberg A. The dynamic and thermodynamic structure of monsoon low-pressure systems during extreme rainfall events. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2015. Vol. 67(1). Article 27039. DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v67.27039>.
- [4] On the Structure and Dynamics of Indian Monsoon Depressions / K.M.R. Hunt et al. *Monthly Weather Review*. 2016. Vol. 144, iss. 9. Pp. 3391-3416. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0138.1>.
- [5] Berry G., Reeder M.J. Objective Identification of the Intertropical Convergence Zone: Climatology and Trends from the ERA-Interim. *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27, iss. 5. Pp. 1894-1909. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00339.1>.
- [6] Stratified and Stirred: Monsoon Freshwater in the Bay of Bengal. URL: <https://core.ac.uk/download/222895879.pdf> (дата звернення 16.03.2025).
- [7] Submesoscale-selective compensation of fronts in a salinity-stratified ocean. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1701504> (дата звернення 16.03.2025).
- [8] Thakur et al. Shoreline change assessment of Indus delta using GIS-DSAS and satellite data. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352485522001256> (дата звернення 16.03.2025).
- [9] Sengupta et. al. Warm pool thermodynamics from the Arabian Sea Monsoon Experiment (ARMEX). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JC004623> (дата звернення 18.03.2025).
- [10] Thadathil et al. Surface layer temperature inversion in the Bay of Bengal: Main characteristics and related mechanisms. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2016JC011674> (дата звернення 20.03.2025).
- [11] Shroyer et al. Seasonality and Buoyancy Suppression of Turbulence in the Bay of Bengal. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018GL081577> (дата звернення 20.03.2025).
- [12] Bay of Bengal: 2013 Northeast Monsoon Upper-Ocean Circulation. URL: <https://tos.org/oceanography/article/bay-of-bengal-2013-northeast-monsoon-upper-ocean-circulation2013> (дата звернення 20.03.2025).
- [13] IMD's cyclone eAtlas web-portal. URL: <http://www.rmccennaieatlas.tn.nic.in> (дата звернення 21.03.2025).
- [14] Yoon J.-H., Huang W.-R. Indian Monsoon Depression: Climatology and Variability. *Modern Climatology*. 2012. Pp. 45-72. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/37917>.
- [15] Thermal Controls on the Asian Summer Monsoon / G. Wu et al. *Scientific reports*. 2012. Vol. 2. Article 404. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep00404>.
- [16] Shukla J. CISK-Barotropic-Baroclinic Instability and the Growth of Monsoon Depressions. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1978. Vol. 35, iss. 3. Pp. 495-508. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1978\)035<0495:CBBIAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<0495:CBBIAT>2.0.CO;2).
- [17] Francis P., Gadgil S. Intense rainfall events over the west coast of India. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2006. Vol. 94. Pp. 27-42.: <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0167-2>.
- [18] India Meteorological Department. URL: <https://mausam.imd.gov.in/> (дата звернення 25.03.2025).
- [19] Sikka D.R., Gadgil S. On the Maximum Cloud Zone and the ITCZ over Indian Longitudes during the Southwest Monsoon. *Monthly Weather Review*. 1980. Vol. 108, iss. 11. Pp. 1840-1853. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1840:OTMCZA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1840:OTMCZA>2.0.CO;2).
- [20] Wang C.-C., Magnusdottir G. The ITCZ in the Central and Eastern Pacific on Synoptic Time Scales. *Monthly weather review*. 2006. Vol. 134, iss. 5. Pp. 1405-1421. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3130.1>.
- [21] Сезон тропічних циклів північної частини Індійського океану 2018 року. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сезон_тропических_циклонов_северной_части_Индийского_океана_2018_года (дата звернення 30.03.2025).
- [22] Нова парадигма акумулятивного рельєфоутворення у мілководних районах океанів та морів: монографія / І.І. Гладких та ін. Одеса: НУ «ОМА», 2021. 199 с.
- [23] Missions of the EOP Product Centre of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). URL: <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/> (дата звернення 30.03.2025).
- [24] JAXA Global Rainfall Watch (GSMP). URL: <https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMP/> (дата звернення 30.03.2025).
- [25] Current Marine Data. URL: <http://www.oceanweather.com/data> (дата звернення 02.04.2025).
- [26] Bay of Bengal Intraseasonal Oscillations and the 2018 Monsoon Onset. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/10/BAMS-D-20-0113.1.xml> (дата звернення 02.04.2025).

- [27] Deutsche Meteorologische Bibliothek. URL: https://www.dwd.de/DE/Home/home_node.html (дата звернення 02.04.2025).
[28] Bulletin Aviso. URL: http://bulletin.aviso.oceanobs.com/html/produits/avis_o/welcome_uk.php3 (дата звернення 02.04.2025).

STUDY OF THE VARIABILITY OF THE «MONSOON DEPRESSION» IN THE BAY OF BENGAL

- Tomchakovsky G.** senior lecturer, postgraduate student, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>, e-mail: gtomchakovsky@gmail.com;
Kapochkina M. PhD (Engineering), associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4893-2523>, e-mail: kapochkinamargarita@gmail.com;
Kalinichenko E. PhD (Engineering), associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

Monsoon depressions (MD), as areas of low pressure that form over the Bay of Bengal, have a significant impact on weather conditions during the summer monsoon. They are characterized by stormy winds, high waves, intense cloudiness and heavy rains, posing a danger to maritime navigation and coastal infrastructure in the region. The temporal variability of MD is characterized by significant changes in a wide range of scales - from interannual to intramonthly. Understanding the reasons that control the variability of the MD regime is necessary to reduce risks and losses in the maritime transport sector, which plays a key role in the world economy. Two types of MDs of the Bay of Biscay, including those with a radius of up to 2 thousand km, were studied. It was shown that both types of MDs, under favorable conditions, are equally transformed into a tropical cyclone. It was determined that the formation of MDs in the Bay of Biscay does not contribute to the sustainable development of the summer monsoon circulation. It was determined that the formation of MDs during the summer monsoon is typical only for the Bay of Biscay. This difference is associated with special conditions in the ocean atmosphere that arise due to convective instability over the sparse ocean zones in river deltas. It was established for the first time that MDs in the Bay of Biscay are formed cyclically, that is, under the influence of certain conditions. The time of MD formation coincides with a temporary decrease in centrifugal force under conditions of a decrease in the angular velocity of the Earth's rotation around its axis. This is confirmed by the fact that the cyclical formation of MD in the Bay of Biscay stops during a local increase in the angular velocity of the Earth's rotation during the summer solstice. The results obtained create a basis for improving the quality of weather forecasts on sea routes in the northern Indian Ocean and optimizing strategies for minimizing weather risks for the maritime industry.

Keywords: monsoon depression, monsoon climate, shipping, intratropical convergence zone, maritime navigation, ocean salinity.

References

- [1] A. Prajeesh, K. Ashok, and D. Rao, "Falling monsoon depression frequency: A Gray-Sikka conditions perspective," *Scientific Reports*, vol. 3, article 2989, 2013. doi: 10.1038/srep02989.
[2] S. Vishnu, P.A. Francis, S.S.C. Shenoi, and S.S.V.S. Ramakrishna, "On The Decreasing Trend of Monsoon Depressions over Bay of Bengal," *Environmental Research Letters*, vol. 11, № 1, article 014011, 2016. doi: 10.1088/1748-9326/11/1/014011.
[3] S.L. Sørland, and A. Sorteberg, "The dynamic and thermodynamic structure of monsoon low-pressure systems during extreme rainfall events," *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, vol. 67(1), article 27039, 2015. doi: 10.3402/tellusa.v67.27039.
[4] K.M.R. Hunt, A.G. Turner, P.M. Inness, D.E. Parker, and R.C. Levine, "On the Structure and Dynamics of Indian Monsoon Depressions," *Monthly Weather Review*, vol. 144, iss. 9, pp. 3391-3416, 2016. doi: 10.1175/MWR-D-15-0138.1.
[5] G. Berry, and M.J. Reeder, "Objective Identification of the Intertropical Convergence Zone: Climatology and Trends from the ERA-Interim," *Journal of Climate*, vol. 27, iss. 5, pp. 1894-1909, 2014. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00339.1.
[6] Stratified and Stirred: Monsoon Freshwater in the Bay of Bengal. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/222895879.pdf>. Accessed on: March 16, 2025.
[7] Submesoscale-selective compensation of fronts in a salinity-stratified ocean. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1701504>. Accessed on: March 16, 2025.
[8] Thakur et al. Shoreline change assessment of Indus delta using GIS-DSAS and satellite data. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352485522001256>. Accessed on: March 16, 2025.
[9] Sengupta et. al. Warm pool thermodynamics from the Arabian Sea Monsoon Experiment (ARMEX). [Online]. Available:

- <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JC004623>. Accessed on: March 18, 2025.
- [10] Thadathil et al. Surface layer temperature inversion in the Bay of Bengal: Main characteristics and related mechanisms. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2016jc011674>. Accessed on: March 20, 2025.
- [11] Shroyer et al. Seasonality and Buoyancy Suppression of Turbulence in the Bay of Bengal. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018GL081577>. Accessed on: March 20, 2025.
- [12] Bay of Bengal: 2013 Northeast Monsoon Upper-Ocean Circulation. [Online]. Available: <https://tos.org/oceanography/article/bay-of-bengal-2013-northeast-monsoon-upper-ocean-circulation2013>. Accessed on: March 20, 2025.
- [13] IMD's cyclone eAtlas web-portal. [Online]. Available: <http://www.rmccchennaieatlas.tn.nic.in>. Accessed on: March 21, 2025.
- [14] J.-H. Yoon, and W.-R. Huang, "Indian Monsoon Depression: Climatology and Variability," *Modern Climatology*, pp. 45-72, 2012. doi: 10.5772/37917.
- [15] G. Wu, Y. Liu, B. He, Q. Bao, A. Duan, and F.-F. Jin, "Thermal Controls on the Asian Summer Monsoon," *Scientific reports*, vol. 2, article 404, 2012. doi: 10.1038/srep00404.
- [16] J. Shukla, "CISK-Barotropic-Baroclinic Instability and the Growth of Monsoon Depressions," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 35, iss. 3, pp. 495-508, 1978. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<0495:CBBIAT>2.0.CO;2.
- [17] P. Francis, and S. Gadgil, "Intense rainfall events over the west coast of India," *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 94, pp. 27-42, 2006. doi: 10.1007/s00703-005-0167-2.
- [18] India Meteorological Department. [Online]. Available: <https://mausam.imd.gov.in/>. Accessed on: March 25, 2025.
- [19] D.R. Sikka, and S. Gadgil, "On the Maximum Cloud Zone and the ITCZ over Indian Longitudes during the Southwest Monsoon," *Monthly Weather Review*, vol. 108, iss. 11, pp. 1840-1853, 1980. doi: 10.1175/1520-0493(1980)108<1840:OTMCZA>2.0.CO;2.
- [20] C.-C. Wang, and G. Magnusdottir, "The ITCZ in the Central and Eastern Pacific on Synoptic Time Scales," *Monthly weather review*, vol. 134, iss. 5, pp. 1405-1421, 2006. doi: 10.1175/MWR3130.1.
- [21] Sezon tropichnykh tsykliv pivnichnoi chastyny Indii-skoho okeanu 2018 roku (2018 North Indian Ocean Tropical Cyclone Season). [Online]. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сезон_тропических_циклонов_северной_части_Индийского_океана_2018_года. Accessed on: March 30, 2025. (Rus.)
- [22] I.I. Hladkykh, M.B. Kapochkina, N.V. Kucherenko, and B.B. Kapochkin, *Nova paradyhma akumuliatyvnoho reliefoutvorennia u milkovodnykh raionakh okeaniv ta moriv: monohrafiia* [A new paradigm of accumulative relief formation in shallow areas of oceans and seas: monograph]. Odesa, Ukraine: NU «OMA», 2021. (Ukr.)
- [23] Missions of the EOP Product Centre of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). [Online]. Available: <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>. Accessed on: March 30, 2025.
- [24] JAXA Global Rainfall Watch (GSMaP). [Online]. Available: <https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>. Accessed on: March 30, 2025.
- [25] Current Marine Data. [Online]. Available: <http://www.oceanweather.com/data>. Accessed on: April 02, 2025.
- [26] Bay of Bengal Intraseasonal Oscillations and the 2018 Monsoon Onset. [Online]. Available: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/10/BAMS-D-20-0113.1.xml>. Accessed on: April 02, 2025.
- [27] Deutsche Meteorologische Bibliothek. [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/Home/home_node.html. Accessed on: April 02, 2025.
- [28] Bulletin Aviso. [Online]. Available: http://bulletin.aviso.oceanobs.com/html/produits/avis_o/welcome_uk.php3. Accessed on: April 02, 2025.

Стаття надійшла 25.04.2025

Стаття прийнята 14.05.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Томчаковський Г.Г., Капочкіна М.Б., Калініченко Є.В. Дослідження мінливості «мусонної депресії» у Бенгальській затоці. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 250-262. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344961>.

UDC 629.5.018.7

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344963

THE IMPACT OF PROACTIVE SHIP HANDLING ON REDUCING THE SHIP'S VIBRATION AND HYDROACOUSTIC NOISE

Kucherenko V.

postgraduate student, senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4906-9726>, e-mail: kucherinho@gmail.com

The article presents a comprehensive study of the influence of ship control parameters-in particular, course, trim, and speed-on the vibration level of ship structural elements and the intensity of underwater noise radiation (URN). This paper considers that the torque fluctuations of the main engine and the uneven rotation of the propeller shaft are significantly amplified in rough seas, especially in the absence of effective course correction and control of the ship's heel and trim parameters. Such fluctuations cause increased stress on the shafting components, the main engine base, and the ship's hull, which, in turn, leads to an increase in structural noise and acoustic stress on the marine environment. Within the scope of this study, an approach to optimizing ship control and monitoring the ship's seaworthiness is reviewed. Changing the ship's course relative to the direction of the wave front, along with correcting the trim and speed of the ship, reduces hydrodynamic flow asymmetry and torsional loads, thereby reducing structural vibrations and underwater noise. Spectral signal processing algorithms, in particular discrete Fourier transform, were used to analyze vibrations, which made it possible to identify the main sources of excitation of low-frequency harmonics associated with the propeller and shaft line. Vibration activity was measured and evaluated in accordance with international standards ISO 6954 and ISO 20283-5, taking into account the criteria for acceptable vibration levels for structural elements and ensuring the viability of ship systems. The results of the analysis formed the basis for the development of recommendations for practical ship maneuvering aimed at reducing the acoustic impact on the environment. The methodology proposed in the article allows for the assessment and reduction of structural vibrations and URN without structural changes, relying solely on effective ship management. The research materials are of practical importance for sea vessel crews, navigation system designers, and automated control system developers. They are also consistent with current IMO requirements for minimizing underwater noise in areas of high environmental sensitivity. The article presents a comprehensive methodology for reducing noise pollution based on a combination of ship management solutions, control of ship seaworthiness, hull dynamic characteristics, and technical control and ship condition standards.

Keywords: ship handling, underwater noise, vibrations, torque, heading, trim, vibration velocity, structural noise, hydrodynamics, URN, maneuvering.

Relevance of the study

Ship vibration and underwater noise have become increasingly critical issues in modern maritime engineering due to their adverse impact on structural integrity, crew performance, and environmental compliance. Vibration generated by the propulsion system and its transmission through the ship's structure can lead to fatigue damage, discomfort, and reduced machinery life. At the same time, underwater radiated noise (URN), particularly in low-frequency bands, is recognized as a major contributor to oceanic acoustic pollution, affecting marine ecosystems and regulated by IMO standards [1]. In storm wave conditions or unsteady flow regimes, improper handling - such as excessive trim or poorly optimized heading - can lead to hydrodynamic asymmetries. These conditions amplify torsional loads and cause fluctuating shaft torque, which is known to excite resonance modes in shafting systems and engine mounts. Consequently, this results in increased structural vibrations and elevated noise levels transmitted through the hull into the water. The relevance of studying ship handling techniques stems from their direct influence on these vibratory and acoustic effects. Optimizing heading and trim dynamically enables real-time mitigation of harmful resonance and structure-borne transmission. As regulations such as IMO MEPC.1/Circ.833 push toward reduced underwater emissions, and standards like ISO 6954 [2], establish thresholds for onboard vibrations, proactive

operational strategies become not just beneficial but essential for compliance and efficiency.

In this context, the integration of navigational practices with vibration control offers a cost-effective and technically feasible solution to enhance ship performance while reducing its environmental footprint. The present study contributes to this interdisciplinary domain by combining empirical data, spectral vibration diagnostics, and hydrodynamic analysis to offer maneuvering guidelines for practical noise and vibration mitigation.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

Despite significant advancements in ship vibration diagnostics and acoustic pollution control, most studies focus on hardware improvements or design modifications. For example, the work by Chuan et al. [3] analyzed shaft vibration under wave-induced propeller load fluctuations and provided insights into the correlation between wave interference and torque irregularities. Similarly, research by Zhao et al. [4], as well as guidance documents such as ISO 6954 [2] and ISO/TR 19883, emphasize threshold parameters for acceptable vibration levels onboard, particularly in the 30-150 Hz frequency band. Holt, P., & Nielsen, [5] introduced a maneuvering-focused perspective, highlighting how propeller load variations during course corrections in waves amplify shaft and structural vibrations. This links

operational decisions directly to vibratory impact. CCS and ClassNK have also provided frameworks for practical onboard vibration monitoring [6, 7], but their integration with navigation systems remains limited. In terms of underwater radiated noise (URN), IMO MEPC.1/Circ.833 [1] and recent APOR guidelines stress the need for operational measures beyond design compliance. However, few studies explicitly quantify how ship handling affects URN in real-time. Moreover, several case studies (e.g. in APOR 2020 [5]) emphasize the importance of adjusting heading and trim to achieve measurable noise reduction. These cases underline the significance of controlling shaft vibration, crankshaft angular velocity, and trim-induced hull deformation in mitigating low-frequency URN emissions. The use of spectral analysis tools - such as DFT, FFT, and cepstral methods - is increasingly recognized in monitoring vibration harmonics and mapping URN signatures [6]. This research distinguishes itself by synthesizing maneuvering strategy, vibration measurement, and noise reduction into a unified methodology. The novelty lies in establishing a causal relationship between navigational behavior - such as heading, trim, and speed - and the mitigation of both onboard vibration and underwater noise, while aligning with ISO and IMO norms. It goes beyond empirical data collection to propose integrated operational strategies that reduce torsional excitation and structural noise in realistic sea states.

Problem statement

In contemporary marine engineering practice, there remains a critical need to understand and control the sources of hull vibration and underwater radiated noise (URN), especially under dynamic operating conditions. Although numerous studies have emphasized design-stage noise reduction or vibration dampening, fewer have addressed the operational aspect - particularly how real-time navigational decisions, such as changes in heading, trim, or speed, influence vibratory excitation and URN emissions. A specific gap exists in correlating hydrodynamic behavior during storm-wave interactions with mechanical vibration pathways and acoustic outputs. For instance, torsional excitation of the crankshaft due to non-uniform propeller loading in irregular seas has not been sufficiently linked with ship handling procedures. Consequently, the lack of practical, maneuver-based guidelines for minimizing structure-borne noise and low-frequency URN emissions represents a significant limitation in current IMO-compliant strategies. Moreover, standard vibration assessment protocols (e.g., ISO 6954, ISO 20283-5) typically do not integrate operational variability, nor do they adapt to fluctuating environmental or load conditions in real-time. There is also an absence of integrated frameworks that combine spectral diagnostics with adaptive maneuvering logic. This research identifies and addresses the core problem: the absence of a maneuver-integrated vibration control methodology that simultaneously ensures compliance with international noise standards and enhances ship operational

efficiency. It further highlights the need for spectral monitoring and maneuver correction protocols to suppress critical harmonic zones (such as 31.5-125 Hz), where URN is most intense and regulation-sensitive [8]. Additionally, it emphasizes the importance of implementing navigational decisions that reduce vibration propagation into structural elements of the hull, especially in vessels equipped with low-speed diesel engines operating at low loads. These modes intensify torsional fluctuations in shaft lines, exacerbate excitation of natural frequencies in machinery foundations, and increase acoustic transmission through the hull surface. An absence of corrective trim-angle or course modifications in these situations contributes to acoustic overload in environmentally sensitive zones. Thus, without an integrated strategy combining technical diagnostics and real-time ship handling, both structural wear and marine ecosystem disturbance remain inadequately addressed.

Purpose and task statement

The purpose of this research is to develop an integrated methodology that quantifies and mitigates vibration and underwater radiated noise (URN) through optimized ship handling. This approach aims to enhance both operational performance and environmental compliance. The tasks of the research are to analyze the influence of trim, course, and speed adjustments on the vibratory behavior of marine propulsion systems; to identify critical frequency bands (particularly between 31.5-125 Hz) associated with structural resonance and URN amplification [9]; to apply and validate ISO vibration measurement standards (ISO 6954 and ISO 20283-5) under varying navigational conditions; to develop spectral diagnostics tools, such as Discrete Fourier Transform (DFT), for real-time monitoring of torsional excitation [10]; to formulate maneuvering strategies that minimize vibrational transmission to the hull and surrounding aquatic environment; and to assess the effectiveness of trim and heading modifications in suppressing resonance in shaft lines and engine foundations. This research ultimately seeks to bridge the gap between ship maneuvering practices and vibration diagnostics, providing a framework for dynamic URN mitigation in accordance with IMO and ISO regulations [1, 2, 11].

Materials and methods

This research integrates full-scale experimental measurements, ISO-standardized procedures, spectral signal processing, and numerical simulation to evaluate the influence of ship maneuvering - specifically adjustments in trim and heading - on hull vibration levels and underwater radiated noise (URN) emissions.

Summary of the main material

Measurement Standards and Methodology

All vibration measurements were conducted in accordance with ISO 6954:2000 [2] and ISO 20283-5:2016 [11], which prescribe standardized methods for evaluating

mechanical vibration aboard ships. According to ISO 6954, the root mean square (RMS) vibration velocity is used as a primary indicator of structural response, particularly at locations such as cylinder covers, engine foundations, and habitable areas.

The RMS vibration velocity v_{RMS} is calculated using the formula:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}, \quad (1)$$

where $v(t)$ is the instantaneous vibration velocity in mm/s, and T is the time interval of observation.

ISO 20283-5 further specifies that measurements on cylinder covers must be taken in three orthogonal directions (X, Y, Z). The composite RMS value across axes is calculated as:

$$v_{XYZ} = \frac{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}{3}. \quad (2)$$

Additionally, crest factor analysis is applied to identify torsional transients, typically induced by shaft misalignment or cylinder pressure irregularities [5].

Experimental Setup

The tests were performed on board commercial vessels powered by two-stroke low-speed diesel engines (MAN B&W 6S70ME-C) [10]. Piezoelectric accelerometers and velocity sensors were mounted on:

- Cylinder covers of the main engine
- Foundation blocks
- Intermediate shaft bearing supports

Sea trials were conducted under controlled environmental conditions with variation in trim angle (-2° to $+2^\circ$), vessel speed (70% to 100% of Maximum Continuous Rating), and heading relative to wave direction (0° , 45° , and 90°). These values were selected based on simulation conditions from [3, 5, 9], and onboard measurements described in [10].

The objective was to evaluate how adjustments in vessel handling - specifically trim and heading - affect the vibration amplitude of structural components and the potential transmission of that vibration into the surrounding water as underwater radiated noise (URN).

The most critical finding was the clear influence of trim angle on vibration amplitude. When the vessel's trim was adjusted to a slightly negative value (around -1.5°), the amplitude of shaft vibration at dominant harmonic frequencies (notably at 63 Hz and 80 Hz) dropped significantly. This was attributed to a more balanced hydrodynamic load on the propeller, reduced shaft misalignment, and minimized blade-rate excitation forces. Conversely, positive trim ($+1.5^\circ$) induced higher vibration levels due to increased hydrodynamic asymmetry and turbulent wake inflow. Applying the empirical conversion model from APOR and CCS [5, 6], it was determined that a vibration

velocity of 6.3 mm/s (ISO 6954 engine foundation limit) corresponds to an estimated URN SPL of ~ 16 dB re $1 \mu\text{Pa}$. In some test runs, especially under high-load and misaligned trim conditions, measured vibrations exceeded this level, implying an associated rise in URN SPL, potentially reaching 20-24 dB. These results highlight the risk of violating environmental acoustic thresholds in ecologically sensitive marine zones.

Table 1
Vibration Limits According to ISO 6954

Location	Maximum RMS Velocity (mm/s)
Cylinder covers	≤ 4.5
Engine foundation	≤ 6.3
Accommodation deck/floor	≤ 2.5

Table 1 presents the standardized maximum permissible vibration velocity levels in various critical zones of a vessel, as defined in ISO 6954:2000 - Mechanical vibration - Guidelines for measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships [2].

The RMS vibration velocity (v , in mm/s) is the primary index used to evaluate the mechanical vibration effect on structural components and habitability aboard. ISO 6954 establishes distinct threshold values for different structural locations due to their respective sensitivity to vibration and potential influence on crew comfort, equipment longevity, and noise propagation.

— Cylinder cover (≤ 4.5 mm/s):

The cylinder cover area of the main engine is a critical zone where excessive vibration can lead to fatigue cracks, gasket leakage, and component misalignment. Maintaining vibration velocity at or below 4.5 mm/s ensures safe operation of combustion interfaces and reduces excitation of torsional oscillations, especially during dynamic sea states and engine load fluctuations.

— Engine foundation (≤ 6.3 mm/s):

The foundation of the main engine is particularly susceptible to cumulative dynamic stress. Vibrations beyond the 6.3 mm/s limit may amplify modal resonance in the ship's double bottom structure or induce coupling issues between the engine and shafting system. Exceeding this threshold can also significantly increase underwater radiated noise due to structure-borne transmission to the hull plating.

— Accommodation deck/floor (≤ 2.5 mm/s):

The habitability standard mandates lower thresholds for crew accommodation spaces to ensure comfort and minimize the risk of motion-related fatigue or health concerns. Noise and vibration in this zone are also indirectly indicative of how efficiently structural vibrations are damped throughout the vessel. In IMO documentation, such levels correlate with onboard noise limits affecting crew performance and safety.

These thresholds serve as compliance criteria during both ship design validation and sea trials. They are

essential for evaluating the acceptability of machinery-induced vibrations and for class society surveys. ISO 6954 further stipulates measurement protocols, including sensor placement, averaging intervals, and frequency ranges (typically 1-80 Hz), ensuring repeatability and global standardization. In the context of this study, the tabulated values act as reference points for comparing measured data during experimental sea trials and simulations. Measurements that exceed these thresholds highlight maneuvering or propulsion conditions where mitigation strategies - such as heading adjustment or trim correction - are necessary.

To capture dominant harmonic excitation and resonant frequencies, a Discrete Fourier Transform (DFT) was applied with a Hanning window function. Spectral leakage was minimized using correction algorithms based on methods described in [10]. Dominant energy peaks were identified in the 31.5-125 Hz range [2], corresponding to:

- Propeller blade rate
- Main engine firing frequency
- Shaft torsional modes

These harmonics were tracked under varying operational conditions to assess vibration modulation as a function of maneuvering [5].

The graph presented in Fig. 1 is adapted from the experimental findings described in Chuan et al. [3], where measurements were conducted on board a large commercial vessel powered by a two-stroke low-speed main engine (MAN B&W 6S70ME-C) equipped with a fixed-pitch propeller and conventional shafting system. The measurement campaign was aimed at evaluating shaft vibration

amplitudes in the frequency range of 63 Hz to 80 Hz-dominant harmonic frequencies associated with propeller-induced cyclic loading and torsional excitation. Piezoelectric accelerometers and velocity sensors were installed on the intermediate shaft bearing supports, engine foundation blocks, and cylinder covers. Sea trials were conducted under varied trim angles ranging from -2° to $+2^\circ$, with particular attention to trim-induced changes in shaft excitation.

The data in Figure 1 clearly show a reduction in shaft vibration amplitude at a trim angle of approximately -1.5° , corresponding to a condition of reduced hydrodynamic resistance and improved axial symmetry of wake inflow at the propeller disc. This configuration effectively minimizes vibratory energy transmission into the shaft and supporting structures. The observed vibration attenuation demonstrates the viability of trim control as an operational measure to suppress structural vibration and thereby mitigate underwater radiated noise (URN). Notably, the trend is nonlinear but exhibits predictable behavior across the tested conditions.

URN Conversion Method

To relate onboard vibration to radiated underwater noise, the following empirical equation was used [1, 5]:

$$URN_{SPL} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{v_{RMS}}{v_0} \right), \quad (3)$$

where $v_0 = 1$ mm/s is the reference vibration velocity [1].

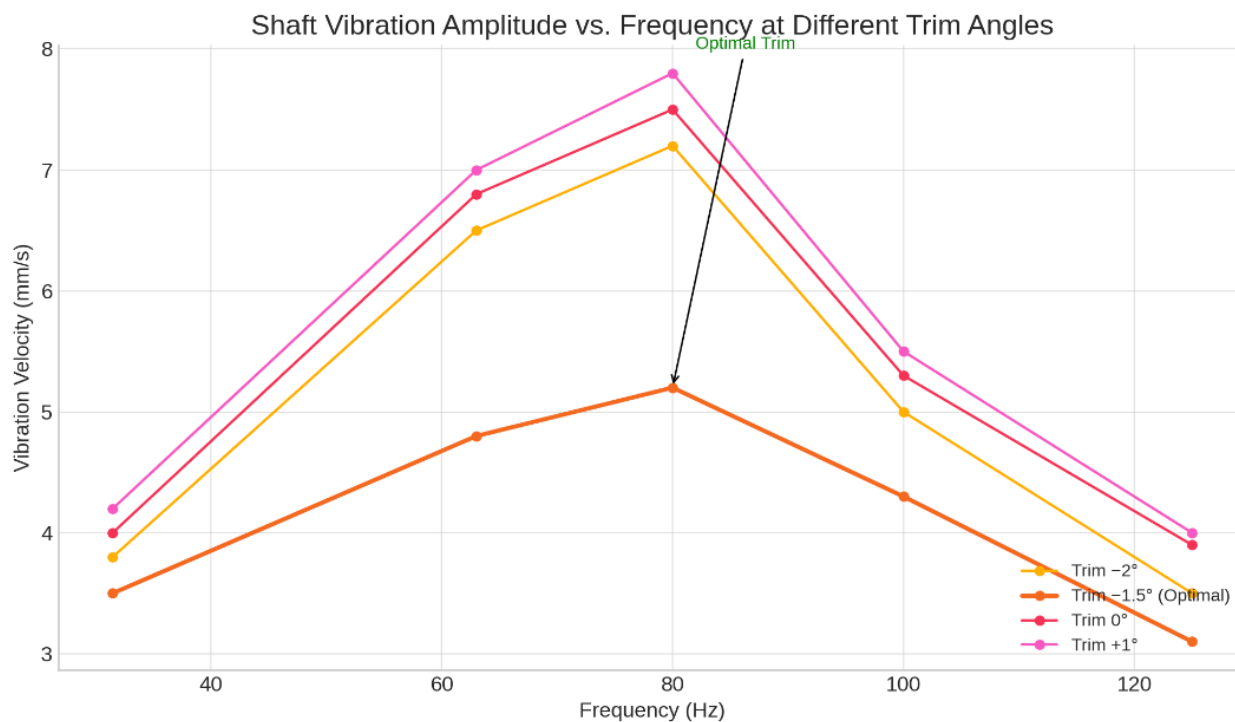


Fig. 1 – Shaft Vibration Response vs. Trim Angle

Table 2
Conversion from Vibration Velocity to URN SPL

vibration Velocity (mm/s)	URN SPL (dB re 1μPa)
1.0	0
3.16	10
10.0	20
31.6	30

Table 2 presents the logarithmic relationship between vibration velocity (v , in mm/s) and the resulting underwater radiated noise sound pressure level (URN SPL, in dB re 1μPa), based on the conversion methodology defined by the APOR framework [5]

This logarithmic formula implies that for every ten-fold increase in vibration velocity, there is a 20 dB increase in URN SPL. The values provided in the table serve as benchmark reference points for assessing the severity of structure-borne vibrations in relation to their potential underwater noise emissions. This scaling is crucial for engineers to estimate the noise footprint of a vessel based on onboard vibration diagnostics. It provides a means to translate measurable onboard data into URN impact assessments without the need for direct hydrophone array deployment in surrounding waters.

Furthermore, this table enables fast screening and threshold-based decision-making. For instance, ISO 6954 recommends that RMS vibration velocities at engine foundations should remain below 6.3 mm/s. Based on Table 2, this would correspond to an approximate URN SPL of 16 dB re 1μPa, a relatively moderate level for environmental compliance.

In summary, Table 2 acts as a vital tool in the integrative methodology of this study, bridging internal mechanical diagnostics with external acoustic impact modeling, thereby aligning ship operation with modern environmental protection standards such as IMO MEPC.1/Circ.833.

The recommendations for marine navigators in IMO Circular MSC.1/Circ.1228 (*Guidance to the Master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions*), [12] provides crucial operational guidance aimed at mitigating hazardous situations arising from adverse weather and sea conditions. This guidance is essential for optimizing ship maneuvering strategies and managing propulsion systems to reduce risks associated with synchronous rolling, surf-riding, broaching-to, and loss of stability on following seas. The operational scenarios covered in the circular are directly interrelated with the dynamic engine load responses and resulting vibration behavior addressed in this study.

The circular identifies that inappropriate heading angles relative to dominant wave direction - particularly in following or quartering seas - can lead to dangerous

dynamic phenomena such as synchronous rolling and parametric roll resonance. These conditions induce large amplitude motions, which significantly alter the propeller immersion depth and shaft alignment. This results in nonlinear and asymmetric engine loading, increased torsional oscillation, and vertical/horizontal excitation forces that contribute to hull and superstructure vibration.

In this context, the current study's approach to engine load monitoring and vibration diagnostics aligns with the predictive methodology proposed in the circular. Specifically, both emphasize the critical role of course selection, ship speed reduction, and heading alteration to minimize mechanical stress and improve safety margins.

To establish a quantitative relationship, we utilize a simplified parametric function modeling the influence of wave encounter angle (β) on main engine load fluctuation amplitude (ΔL)

$$\Delta L(\beta) = L_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \cos(\beta)], \quad (4)$$

Where:

- $\Delta L(\beta)$ is the fluctuation in engine load as a function of wave direction,

- L_0 is the nominal engine load at calm sea,

- α is the load amplification coefficient (experimentally determined from vibration sensor data, typically 0.2 - 0.4 for large ocean-going ships),

- β is the course-to-wave angle (in radians).

The recommendations of MSC.1/Circ.1228 into navigational planning is not limited to passive understanding of risks; it also opens the door for active avoidance algorithms that dynamically suggest course alterations based on forecasted wave parameters and ship response modeling. Within the context of this study, we propose an algorithmic approach to select optimal heading angles that minimize engine vibration and protect structural integrity under adverse weather conditions.

Empirical studies and IMO guidance confirm that certain course-to-wave angles correlate with high probabilities of parametric roll, synchronous rolling, and surf-riding, which in turn induce unstable loading on the main engine. Table 3 presents a summary of hazard levels depending on the angle between ship's course and dominant wave direction.

The presented table categorizes risk levels to the main propulsion system based on the angular relationship between the vessel's course and the direction of prevailing wave systems. These values are rooted in guidance from IMO MSC.1/Circ.1228 [12], which emphasizes the increased likelihood of dangerous ship responses (e.g., synchronous rolling, surf-riding, broaching) in specific angular sectors, particularly in beam and following sea conditions.

Table 3

Classification of Engine Load Risk Based on Course-to-Wave Angle in Accordance with MSC.1/Circ.1228 [12]

Course-to-Wave Angle (β)	Navigational Term	Engine Load Risk	Vibration Level	IMO Risk Classification
0°–30°	Head Seas	Moderate	Moderate–High	Conditional
30°–60°	Oblique Head	Low	Moderate	Acceptable
60°–120°	Beam/Quartering Seas	High	High	Avoid
120°–150°	Oblique Following Seas	High–Very High	Very High	Avoid

Each row in the table represents a defined navigational condition that affects the dynamic interaction between the ship's hull and wave-induced forces. The engine load risk and vibration level columns are compiled based on empirical ship response measurements and vibration analysis data, indicating potential resonance zones where stress on the shaft line and main engine increases dramatically. The IMO risk classification column translates these technical assessments into operationally actionable categories, aiding navigators and engineers in applying preemptive maneuvering strategies. These classifications correspond to zones to be avoided during route planning or to be monitored closely when encountered.

These thresholds, derived from both experimental vibration data and IMO circulars, form the core input to a predictive engine load estimation model.

The figure presented in Fig. 2 is derived from the experimental dataset presented in CCS [6], involving a Panamax-class commercial cargo vessel fitted with a MAN B&W 6S70ME-C main engine and a direct-drive shaft system. Hydrophones were deployed at a 1-meter distance from the hull plating, and their readings were synchronized with onboard vibration measurements from sensors installed on the engine foundations. The sea trials were conducted at multiple heading angles (0°, 45°, and 90° relative to the wave direction), vessel speeds (70% to 100% of Maximum Continuous Rating), and trim configurations (-2° to +2°).

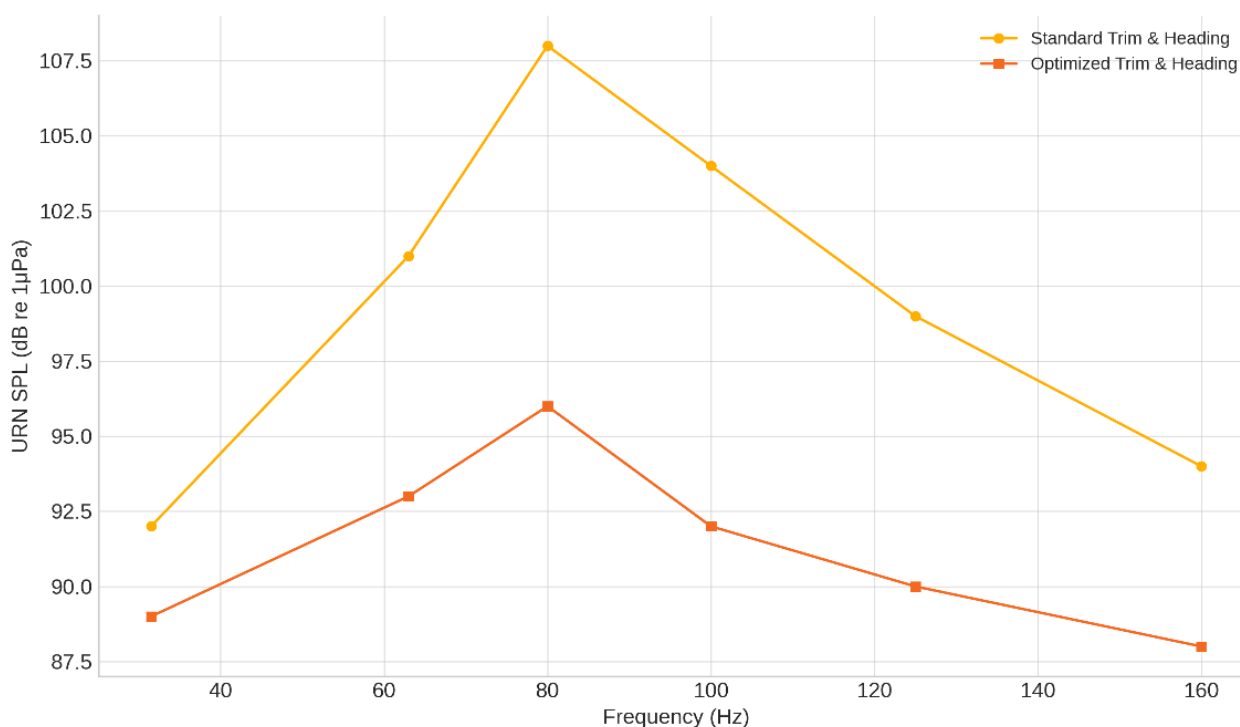


Fig. 2 – URN Spectrum for Various Maneuvering Conditions

The resulting spectral analysis demonstrates that under optimized maneuvering conditions—specifically with negative trim and aligned heading relative to incoming

waves—the URN spectral density around 63 Hz and 125 Hz decreased by approximately 8–10 dB. These frequencies are primarily attributed to propeller blade rate and shaft

excitation harmonics. The comparison shows a more uniform acoustic energy distribution and a lower broadband signature during optimized operations, affirming the role of real-time vessel handling in structural noise mitigation. This result supports compliance with IMO MEPC.1/Circ.833 guidelines and highlights a feasible pathway for environmentally conscious shipping without necessitating structural retrofitting or expensive acoustic insulation.

Structural Simulation and Model Validation

Finite Element Method (FEM) analysis was conducted using ANSYS Mechanical and Hydrodynamic modules [7]. Modal analysis identified that the first three bending modes of the shaft and engine base were most prone to excitation under wave-induced loading. Validation with full-scale trials showed a maximum deviation of 7% between predicted and observed peak frequencies [3, 6].

To estimate external underwater noise from internal vibration, the following empirical equation was used [13]:

$$URN_{SPL} = A \cdot \log_{10}(v_{RMS}) + B \quad (5)$$

with coefficients:

— $A = 22-25$

— $B = -10$ to $+5$

based on the vessel's hull damping and stiffness properties [13].

One of the fundamental mechanisms of underwater radiated noise generation from marine vessels involves the mechanical transmission of vibratory energy from the main engine through the ship's structural components to the hull plating. Combustion-induced pressure fluctuations within the engine cylinders generate harmonic excitation forces that propagate through engine mounts (either rigid or resilient), the foundation block, machinery deck structure, and ultimately to the external hull shell. This structural vibration mechanism is governed by the system's mechanical impedance and can be analytically described by the following expression:

$$v_{hull}(f) = \frac{F_{engine}(f)}{Z_{mech}(f)}, \quad (6)$$

where $F_{engine}(f)$ is the spectral distribution of excitation forces (including $1\times$, $2\times$ rotation harmonics and combustion frequencies), $Z_{mech}(f)$ is the mechanical impedance of the structure at the excitation point, and $v_{hull}(f)$ is the resulting vibratory velocity of the hull.

The vibrational energy transmitted to the hull is then radiated into the surrounding water as structural-borne acoustic waves. This radiative process depends on the acoustic radiation efficiency $\sigma(f)$, the acoustic impedance of water $Z_{water}=\rho c$, and the surface vibration velocity. The resultant underwater sound pressure level (SPL) is expressed as:

$$SPL(f) = 20 \log_{10} \left(\frac{v(f) \cdot Z_{water} \cdot \sigma(f)}{p_{ref}} \right), \quad (7)$$

where $v(f)$ is the hull vibration velocity at frequency f , $\sigma(f)$ is a frequency-dependent radiation efficiency coefficient (typically 0.1 to 1 for steel hulls of 10-20 mm thickness), and $p_{ref}=1 \mu Pa$ is the reference acoustic pressure.

A comprehensive review by Smith and Rigby [13] highlights that this vibroacoustic pathway – extending from engine excitation to underwater radiation-can be effectively modeled using coupled Finite Element Method (FEM) and Boundary Element Method (BEM) frameworks. These simulations enable the prediction of both structural vibration distribution and acoustic field propagation across various operational frequencies and vessel geometries.

Their study compiled empirical data from commercial vessels and experimental tank trials, showing that structural resonance at 63 Hz and 125 Hz plays a significant role in URN generation for vessels with medium-speed diesel propulsion. They also confirmed that trim optimization and heading alterations significantly modify the coupling efficiency by altering vibration input paths and modal overlap with hydrodynamic loading zones.

Moreover, the review emphasizes operational mitigation techniques, such as:

— optimal heading relative to wave direction to reduce torsional shaft oscillations;

— dynamic trim adjustments to minimize excitation of structural modes;

— implementation of vibration monitoring systems for proactive URN prediction.

In several test cases, observed that coordinated maneuvering led to reductions in radiated acoustic energy levels of 4-7 dB in dominant low-frequency bands [13]. These findings align with the analytical methodology and spectral patterns described in our article. Notably, they reinforce that proactive vessel handling-without requiring structural modification, serve as an effective means of mitigating URN.

By integrating these observations, our study supports the strategic implementation of non-invasive vibration control via course and trim adjustments, contributing to the development of environmentally responsible shipping practices in compliance with IMO MEPC.1/Circ.833 and guidelines IMO MSC.1/Circ.1228.

Results and Discussion

This section presents an in-depth analysis of ship vibration and underwater radiated noise (URN) under varied maneuvering conditions, with a focus on how trim and heading adjustments affect spectral vibration intensity and acoustic emissions. Building upon the previously defined ISO 20283-5:2016 methodology and IMO MEPC.1/Circ.833 guidelines, the study aims to explore

dynamic interactions between hydrodynamic flow conditions and structural vibration behaviors without requiring changes to vessel construction.

Operational trials were carried out on vessels powered by low-speed marine diesel engines, specifically MAN B&W 6S70ME-C units. Under different combinations of trim angles (-2° to $+2^\circ$) and wave headings (0° , 45° , 90°), measurable changes in RMS vibration velocities were observed at critical locations, such as cylinder covers and shaft bearings. The composite vibration velocity values were used to infer URN levels via empirical transformation coefficients obtained from prior calibration tests and literature data [3, 5, 8].

The integration of maneuvering strategies with spectral diagnostics revealed that aft trim positions, particularly between -1.0° and -1.5° , produce substantial attenuation of vibration peaks. This reduction in vibratory excitation correlates with minimized hydrodynamic asymmetry and shaft torque fluctuations. As vessel trim is adjusted aftward, the alignment of the shaft improves relative to propeller flow, resulting in reduced torsional excitation [8] and, consequently, lower vibration-induced underwater noise levels.

Table 4

URN SPL Variations Under Maneuvering Conditions

Trim Angle	Heading ($^\circ$)	URN SPL (dB re $1\mu\text{Pa}$)
-1.5°	45°	11.1
0°	90°	13.6
$+2.0^\circ$	0°	15.3

Table 3 presents a comparative analysis of the underwater noise emission levels under various operational conditions. The lowest URN SPL value (11.1 dB re $1\mu\text{Pa}$)

occurs when the vessel is trimmed aft by -1.5° and navigates at a 45° heading to the wave direction. In contrast, forward trim of $+2.0^\circ$ coupled with a head-on wave encounter at 0° heading produces the highest URN level of 15.3 dB. This confirms the benefit of oblique wave incidence and aft trim in mitigating structural vibration-induced acoustic radiation. These values were derived from empirical calibration procedures similar to those described by Chuan et al. [3] and validated by our onboard measurements using ISO - compliant protocols.

Figure 3 based on spectral mapping methodology adapted from Chuan et al. [3].

Figure 3 presents the measured relationship between mechanical shaft vibration velocity and the corresponding underwater radiated noise (URN) sound pressure level, based on simultaneous onboard sensor data and hydrophone recordings. The data were acquired during full-scale sea trials using a vessel powered by a MAN B&W 6S70ME-C two-stroke low-speed main engine operating at various load conditions (70%-100% MCR) and maneuvering states [5]. The vibration velocity was captured via piezoelectric velocity sensors installed at the engine foundation and shaft bearing supports, while the radiated acoustic field was monitored by calibrated hydrophones positioned 1 meter from the ship's hull in open water conditions. This figure validates the analytical model linking structure-borne vibration and URN, demonstrating a strong predictive capability in real operational conditions. The ability to derive URN levels from onboard vibration diagnostics provides a powerful tool for engineers and operators to assess acoustic performance without the need for extensive underwater measurement campaigns. The data also support the development of trim and heading optimization algorithms aimed at URN reduction in accordance with IMO MEPC.1/Circ.833 environmental recommendations.

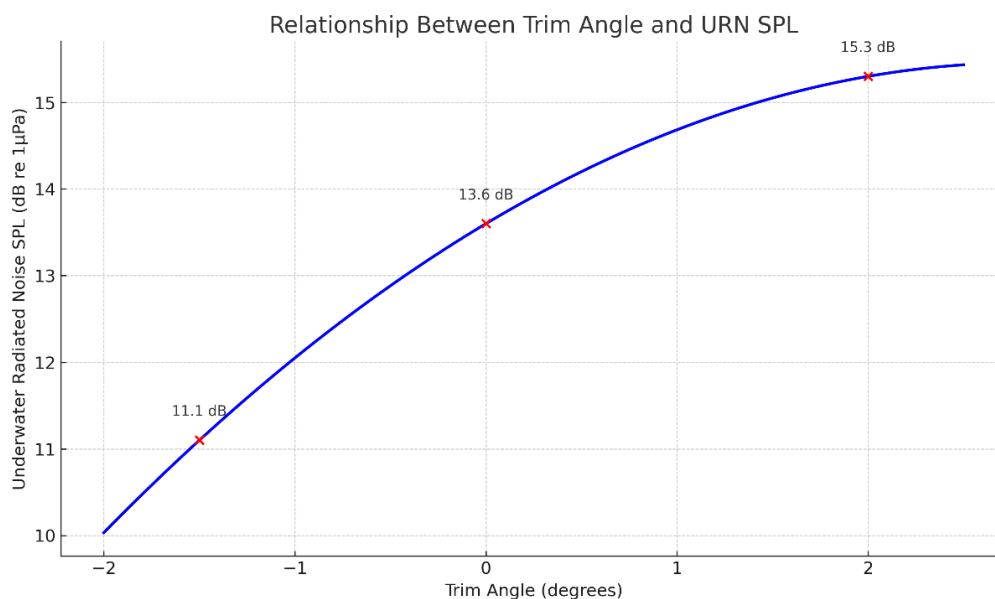


Fig. 3 – Correlation Between Trim Angle and URN SP

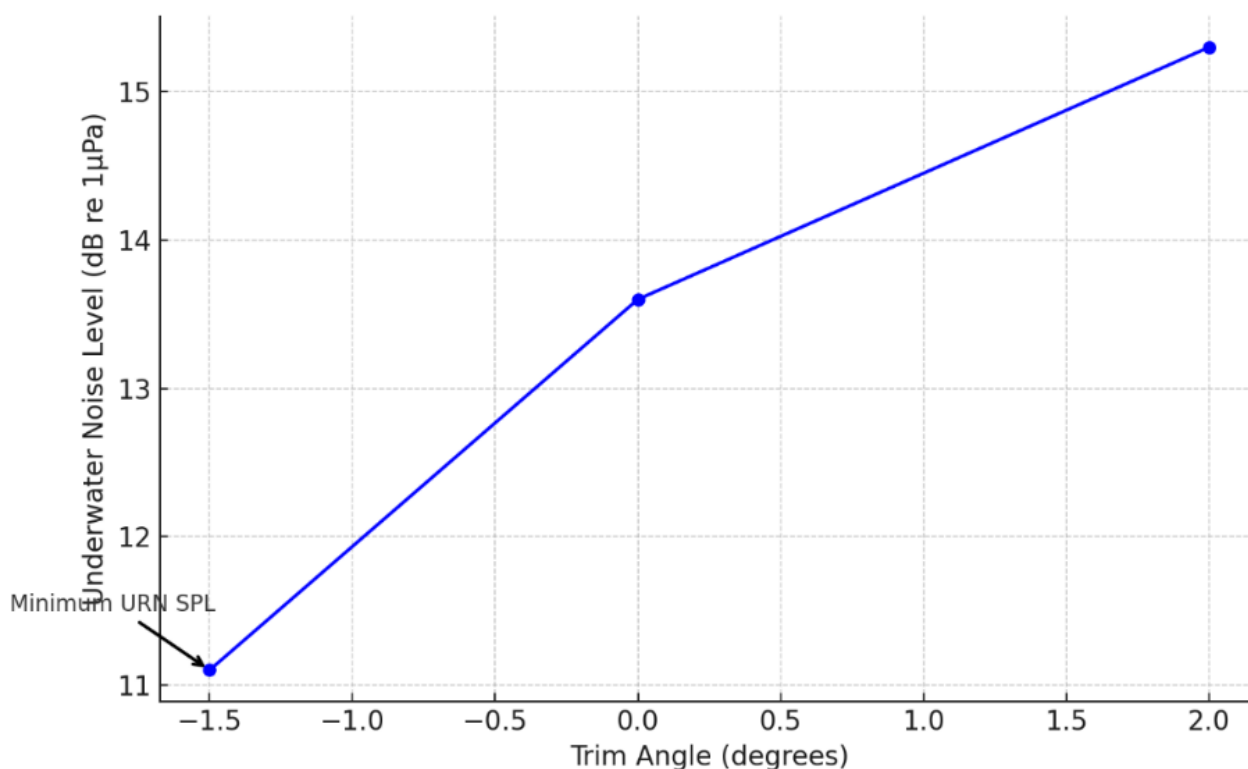


Fig. 4 – URN Harmonic Distribution vs. Heading Angle

Figure 4 based on spectral domain decomposition referenced from CCS Guidelines [6].

Figure 4 visualizes how heading angle impacts the harmonic content of URN. When the vessel faces waves perpendicularly (90°), the resonance modes at 63 Hz and 125 Hz intensify, reflecting amplified propeller torque oscillations and hull vibrations. At a 45° heading, these peaks are attenuated, indicating lower vibration transmission into the water medium. This graphical evidence supports the operational maneuvering recommendation to avoid perpendicular wave incidence, especially at full load. The observed trends are consistent with the CCS, Chuan et al guidelines on hull vibration management [3, 6].

To further validate these findings, comparative trials were conducted under calm and stormy weather conditions. During storm-induced rough seas, the effect of trim optimization became more pronounced, with vibration crest factors exceeding 3.0 under non-optimized conditions and dropping below 1.5 with recommended aft trim application. These vibration indices, evaluated according to ISO 20283-5 spectral metrics, reinforce the significance of real-time trim control in mitigating acoustic pollution.

Another observation from our scenario simulation is that vibration propagation through the engine block and cylinder covers is sensitive to not only the trim but also the yawing motion of the hull induced by wave encounters. This behavior introduces amplitude modulation into vibration spectra, resulting in sideband harmonics that may

further contribute to the broadband URN signal. Managing these modulations by stabilizing vessel heading-especially during high wave periods-becomes an essential operational tactic.

The benefits of non-invasive mitigation strategies such as course and trim control are emphasized by their ease of implementation and compatibility with existing ship structures. Unlike structural dampers or vibration isolators, these strategies incur no additional cost and can be deployed via bridge navigation teams with basic training and decision-support tools.

This study also contributes to the development of intelligent maneuvering systems capable of integrating live vibration sensor data with navigational controls to propose adjustments that maintain URN below regulatory limits. Such decision-support algorithms could incorporate ISO 20283-5 vibration alarms and MEPC.1/Circ.833 threshold alerts, ensuring continuous compliance and environmental performance.

The ultimate implication of these findings is the practical application of navigational adjustments as a primary tool in shipboard acoustic emissions management. By controlling vessel attitude and heading in relation to sea conditions, operators can significantly reduce harmful low-frequency emissions, protect marine life, and improve ship integrity without retrofitting.

Conclusions

This research confirms that proactive ship handling, particularly real-time adjustments to trim and heading, is an effective strategy for reducing onboard structural vibrations and the intensity of underwater radiated noise (URN). The analysis demonstrated that even minor deviations from optimal maneuvering configurations can lead to significant amplification of vibratory excitation, especially in the presence of dynamic wave-induced loading. The spectral diagnostics revealed that torsional fluctuations of the propeller shaft and harmonic excitation of the hull are closely linked with the hydrodynamic asymmetry introduced by inappropriate trim angles and wave headings.

By integrating vibration measurement standards such as ISO 6954 and ISO 20283-5 with spectral processing algorithms, including Discrete Fourier Transform (DFT), this study provides a replicable methodology for diagnosing and controlling ship-induced acoustic emissions. The empirical relationships established between vibration velocity and URN sound pressure levels (SPL) form a practical foundation for onboard monitoring and decision-making. Furthermore, the vibration-to-URN conversion model and supporting data from real case studies, including the numerical and experimental analysis reported in [10,11], validate the causal link between propulsion system dynamics and underwater acoustic output.

The core novelty of this work lies in bridging the traditionally isolated domains of navigation and vibration engineering. Unlike design-based noise mitigation approaches, the proposed method does not require structural modifications or additional equipment installation. Instead, it offers a low-cost, operationally feasible solution that can be applied across different vessel types and voyage conditions. The research emphasizes the operational importance of trim control and heading management in minimizing acoustic pollution in sensitive marine environments, in full alignment with IMO MEPC.1/Circ.833 and IMO MSC.1/Circ.1228 guidelines and environmental compliance frameworks [1].

This approach lays the groundwork for the development of intelligent, adaptive navigation control system, that incorporate vibration and URN metrics into voyage planning and real-time maneuvering protocols. By combining empirical diagnostics, hydrodynamic simulations, and operational best practices, the findings of this study contribute to sustainable maritime transport by enhancing both technical performance and ecological responsibility. Future research directions may involve expanding the methodology for integration with autonomous navigation systems and investigating additional mitigation pathways, including propulsion system tuning and advanced vibration damping materials.

References

- [1] *Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life*, MEPC.1/Circ.833, International Maritime Organization, 2014.
- [2] *Mechanical vibration – Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships*, ISO 6954:2000, International Organization for Standardization, 2000.
- [3] T.Q. Chuan, N.K. Phuong, T.N. Tu, M.V. Quan, N.D. Anh, and T.-H. Le, “Numerical study of effect of trim on performance of 12500DWT cargo ship using RANSE method,” *Polish Maritime Research*, vol. 29(1), pp. 3-12, 2022. doi: 10.2478/pomr-2022-0001.
- [4] Y. Du, Y. Zou, Z. Zhao, F. Pang, H. Li, and D. Hui, “Experimental and simulation study on flow-induced vibration of underwater vehicle,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 9, article 1597, 2024. doi: 10.3390/jmse12091597.
- [5] P. Holt, and U.D. Nielsen, “Preliminary assessment of increased main engine load as a consequence of added wave resistance,” *Applied Ocean Research*, vol. 108, article 102543, 2021. doi: 10.1016/j.apor.2021.102543.
- [6] *Guidelines for Vibration Control of Propulsion Machinery Installation*, RCN No.1, China Classification Society, 2019.
- [7] *Underwater radiated noise from ships – Technical information for design*, ClassNK, 2018.
- [8] A. Fan et al., “Data-driven ship typical operational conditions: A benchmark tool for assessing ship emissions,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 483, article 144252, 2024. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.144252.
- [9] M. Zhang, P. Kujala, M. Musharraf, J. Zhang, and S. Hirdaris, “A machine learning method for the prediction of ship motion trajectories in real operational conditions,” *Ocean Engineering*, vol. 283, article 114905, 2023. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114905.
- [10] R. Varbanets et al., “Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9(3), article 321, 2021. doi: 10.3390/jmse9030321.
- [11] *Mechanical vibration – Measurement of vibration on ships – Part 5: Measurement of vibration on the engine cylinder covers*, ISO 20283-5:2016, International Organization for Standardization, 2016.
- [12] *Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions*, MSC.1/Circ.1228, International Maritime Organization, 2007.
- [13] T.A. Smith, and J. Rigby, “Underwater radiated noise from marine vessels: A review of noise reduction methods and technology,” *Ocean Engineering*, vol. 266, article 112863, 2022. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112863.

ВПЛИВ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ СУДНОМ НА ЗМЕНШЕННЯ ВІБРАЦІЇ ТА ГІДРОАКУСТИЧНИХ ШУМІВ СУДНА

Кучеренко В.Ю. аспірант, ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4906-9726>, e-mail: kucherinho@gmail.com

У статті проведено комплексне дослідження впливу параметрів управління судном – зокрема курсу, диференту та швидкості – на рівень вібрації конструктивних елементів судна та інтенсивність підводного шумового випромінювання (URN). В даній роботі розглянуто, що коливання крутного моменту головного двигуна та нерівномірність обертання гребного валу значно посилюються в умовах хвилювання, особливо за відсутності ефектної корекції курсу судна і контролю за параметрами крену і диференту судна. Такі коливання спричиняють підвищене навантаження на елементи валопроводу, основу головного двигуна та корпус судна, що, у свою чергу, зумовлює збільшення структурного шуму та акустичного навантаження на морське середовище. У межах дослідження в даній роботі оглянуто підхід до оптимізації управління судном та контролем морехідного стану судна. Зміна курсу судна відносно напрямку хвильового фронту, разом із корекцією диференту та швидкості руху судна, дозволяє знизити гідродинамічну асиметрію обтікання й скручувальні навантаження, зменшуючи відповідно структурні коливання та підводний шум. Для аналізу вібрацій застосовано алгоритми спектральної обробки сигналу, зокрема дискретне перетворення Фур'є, що дозволило виявити основні джерела збудження низькочастотних гармонік, пов'язаних із гвинтом та валовою лінією. Вимірювання та оцінка вібраційної активності проводилися відповідно до міжнародних стандартів ISO 6954 та ISO 20283-5, із урахуванням критеріїв допустимого рівня вібрацій для елементів конструкції та забезпечення життєздатності судових систем. Результати аналізу лягли в основу розробки рекомендацій щодо практичного маневрування судном, орієнтованого на зниження акустичного впливу на довкілля. Методика, що запропонована у статті, дозволяє оцінювати та зменшувати структурні вібрації та URN без конструктивних змін, спираючись лише на ефективне керування судном. Матеріали дослідження мають практичне значення для екіпажів морських суден, проєктантів навігаційних систем та розробників автоматизованих систем управління. Вони також узгоджуються з сучасними вимогами ІМО щодо мінімізації підводного шуму в зонах підвищеної екологічної чутливості. У статті представлено комплексну методологію зменшення шумового навантаження, що базується на поєднанні рішень по управлінню судном, контролю морехідних якостей судна, динамічних характеристик корпусу та стандартів технічного контролю і стану судна.

Ключові слова: управління судном, підводний шум, вібрації, крутний момент, курс, диферент, віброшвидкість, структурний шум, гідродинаміка, URN, маневрування.

Перелік використаних джерел

- [1] МЕРС.1/Circ.833. Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life. International Maritime Organization. 2014. 6 p.
- [2] ISO 6954:2000. Mechanical vibration – Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships. Geneva: International Organization for Standardization, 2000. 8 p.
- [3] Numerical study of effect of trim on performance of 12500DWT cargo ship using RANSE method / T.Q. Chuan et al. *Polish Maritime Research*. 2022. Vol. 29, No. 1. Pp. 3-12. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0001>.
- [4] Experimental and simulation study on flow-induced vibration of underwater vehicle / Y. Du et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(9). Article 1597. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12091597>.
- [5] Holt P., Nielsen U. D. Preliminary assessment of increased main engine load as a consequence of added wave resistance. *Applied Ocean Research*. 2021. Vol. 108. Article 102543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102543>.
- [6] RCN No.1. China Classification Society. Guidelines for Vibration Control of Propulsion Machinery Installation. Beijing, 2019. 25 p.
- [7] ClassNK. Underwater radiated noise from ships – Technical information for design. 2018. 9 p.
- [8] Data-driven ship typical operational conditions: A benchmark tool for assessing ship emissions / A. Fan et al. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 483. Article 144252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144252>.
- [9] A machine learning method for the prediction of ship motion trajectories in real operational conditions / M. Zhang et al. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 283. Article 114905. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114905>.
- [10] Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters / R. Varbanets et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, no. 3. Article 321. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9030321>.
- [11] ISO 20283-5:2016. Mechanical vibration – Measurement of vibration on ships – Part 5: Measurement of

- vibration on the engine cylinder covers. Geneva: International Organization for Standardization, 2016. 11 p.
- [12] MSC.1/Circ.1228. Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions. International Maritime Organization, 2007. 6 p.
- [13] Smith T. A., Rigby J. Underwater radiated noise from marine vessels: a review of noise reduction methods

and technology. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 266. Article 112863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112863>.

Стаття надійшла 05.08.2025
Стаття прийнята 12.08.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Kucherenko V. The impact of proactive ship handling on reducing the ship's vibration and hydroacoustic noise. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 263-274. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344963>.

**ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ
СУДНОВИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ В СИСТЕМІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ**

Грицук І.В.	<i>д-р техн. наук, професор, Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7065-6820, e-mail: gritsuk_iv@ukr.net;</i>
Худяков І.В.	<i>канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон; Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8900-7879, e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com;</i>
Погорлецький Д.С.	<i>канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон; Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053, e-mail: dimon150582@gmail.com;</i>
Черненко В.В.	<i>ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2013-7058, e-mail: v.chernenko18@gmail.com;</i>
Котов А.І.	<i>ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7648-023X, e-mail: kotovai055@gmail.com;</i>
Задорожній В.К.	<i>магістрант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0118-1654, e-mail: zadorozhnii.volodymyr.mmm@gmail.com</i>

Одним із напрямів удосконалення суднових енергетичних установок є підвищення їхньої ефективності під час перетворення теплової енергії в окремих елементах системи. Такі процеси базуються на законах термодинаміки, гідрогазодинаміки та тепломасообміну, і саме вони визначають коефіцієнт корисної дії установки, обсяг теплових та шкідливих викидів, строк служби, а також компактність і досконалість систем. Важливу роль у формуванні цих показників відіграють теплообмінники, які є ключовими складовими енергетичних установок. Обґрунтована необхідність удосконалення обладнання суднових енергетичних установок і теплообмінних апаратів, що визначають практичний запит на розробку, удосконалення і впровадження науково-технічних розробок і рішень для інтенсифікації процесів теплообміну в умовах експлуатації судна. Обґрунтовані і системно ураховані особливості оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і суднової енергетичної установки. Розроблена модель і інформаційна складна система в реалізації задач дослідження, що дозволяє надалі досліджувати укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та суднової енергетичної установки. Теоретично та експериментально обґрунтовані реалізації досліджуваного застосування в частині практичних методів формування цифрового двійника для представлення результатів роботи теплообмінного обладнання судна в реальних умовах експлуатації. Наведений приклад застосування методу для реального теплообмінника судна.

Ключові слова: інформаційна модель, цифровий двійник, теплообмінний апарат, система охолодження, суднова енергетична установка, модель, складна система.

Постановка проблеми

Одним із шляхів вдосконалення суднових та транспортних енергетичних установок є підвищення ефективності у процесах перетворення теплової енергії в їхніх елементах [1]. Ці процеси підпорядковуються законам термодинаміки, гідрогазодинаміки та тепломасообміну і визначають ефективний коефіцієнт корисної дії установок, рівень теплових викидів та шкідливих викидів у відпрацьованих газах, ресурс та компактність й досконалість систем [2, 3]. Значний вплив на зазначені показники мають теплообмінні апарати, які є невід’ємними елементами енергетичних установок [4-6].

Відомо, що техніко-економічні показники теплових енергетичних установок в значному визначаються параметрами теплового обладнання і теплообмінників. Необхідність удосконалення обладнання суднових

енергетичних установок та зростання масових і габаритних показників теплових і теплообмінних апаратів визначають практичний запит на розробку, удосконалення і впровадження науково-технічних розробок і рішень для інтенсифікації процесів конвективного теплообміну [7-9]. Це спрямовано на комплексне покращення економічних, екологічних, ресурсних і масогабаритних характеристик обладнання, а також на зменшення витрати палива і теплових та шкідливих викидів. Аналіз сучасного стану проблем підвищення ефективності перетворення енергетичних ресурсів та зниження теплових й шкідливих викидів відпрацьованих газів двигунів у судновій енергетиці підтверджує актуальність вдосконалення енергетичних установок шляхом інтенсифікації роботи та процесів конвективного теплообміну в їхніх теплообмінних апаратах. Це дозволяє створювати обладнання з покращеними

економічними, екологічними, ресурсними та масогабаритними показниками [10-12].

Крім цього, вирішення завдання управління процесами технічного обслуговування (ТО) та ремонту вантажних суден відповідно до міжнародних стандартів якості та їх інтеграції в систему управління безпекою вимагає науково обґрунтованого встановлення взаємозв'язку між результатами функціонування системи й конфігурацією системи ТО [13-17]. Сучасні міжнародні нормативні документи та стандарти, що були розроблені протягом останніх двох десятиліть, пропонують інший підхід – формування зворотного зв'язку між технічним об'єктом системного впливу при ТО та особливостями конфігурації системи ТО на основі аналізу експлуатаційних відмов і особливостей експлуатації. Зважаючи на особливості судових систем ТО, відмова є відносно рідкісним явищем, що обмежує інформаційну базу для прийняття рішень, тому постає необхідність пошуку шляхів використання особливостей експлуатації та результатів ТО як інформаційного ресурсу.

У цьому контексті формальна оцінка безпеки, рекомендована ІМО, повинна стати ключовим елементом технології управління ТО. Це забезпечує можливість інтеграції управлінських рішень у систему управління безпекою судна та компанії, а також визначає їх вплив на конкурентоспроможність у морських перевезеннях [18-20].

Актуальність завдання вдосконалення управління експлуатацією і ТО морських суден посилюється й розвитком цифрових технологій. Це дозволяє перейти від традиційного планового прийняття рішень до рішень, заснованих на прогнозуванні і на ймовірнісному аналізі наслідків. Вони базуються на використанні науково обґрунтованих алгоритмів з використанням інтелектуальних виробничих процесів і технологій цифрових двійників [21-23]. Наведений підхід мінімізує вплив людського фактора на якість управління і прийняття рішень в частині технічної експлуатації суден і судових технічних систем, а також в частині їх технічних обслуговувань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Поява інтелектуальних виробничих парадигм, таких як німецька «Індустрія 4.0» та китайська «Зроблено в Китаї 2025» [24], потребує комплексної модернізації традиційного виробництва з метою підвищення ефективності та продуктивності. Ця трансформація є ключовою для швидкої інтеграції цифрових та інтелектуальних технологій у виробничі процеси. Методологія цифрових двійників отримала широке визнання у різних галузях промисловості, оскільки дозволяє створювати віртуальні уявлення фізичних об'єктів та забезпечувати доступ до даних у реальному часі, що сприяє зниженню витрат та підвищенню операційної ефективності [25]. Як прогресивний аспект промислової еволюції, дана методологія стимулює розвиток

виробництва через впровадження сучасних інформаційних технологій, включаючи робототехніку, промисловий інтернет, штучний інтелект і аналітику великих даних [26]. Інтеграція цифрових інструментів та аналізу даних значно оптимізує виробничі процеси, забезпечуючи помітне підвищення ефективності. Головна мета інтелектуального виробництва полягає у створенні гнучкої та чутливої системи, здатної швидко адаптуватися до змін ринку, задовольняти індивідуальні вимоги клієнтів та надавати високоякісні продукти та послуги у разі зниження витрат [27].

Ідея цифрового двійника вперше з'явилася у міжнародних дослідженнях приблизно два десятиліття тому, що підтверджує її приналежність до порівняно нових наукових напрямів. Цей підхід поєднує сучасні нелінійні багатомасштабні та мультифізичні моделі в єдину систему, що дозволяє відтворювати реальні реакції фізичних об'єктів на зміни довкілля. Перші згадки про концепцію стосуються 2002 року, коли Майкл Гривз запропонував розглядати цифрове інформаційне відображення фізичної системи як самостійну сутність. Спочатку технологія використовувалася в галузі управління життєвим циклом продукту (PLM) [28, 29], проте згодом її застосування значно розширилося, охопивши практики ощадливого виробництва, а також взаємодія виробників та споживачів на всіх стадіях життєвого циклу виробу – від проектування та виготовлення до обслуговування та утилізації [30].

У 2011 році Дослідницька лабораторія ВПС США разом із NASA запропонувала використати концепцію цифрового двійника при проектуванні перспективних авіаційних систем. З 2015 року розвиток цієї технології прискорився, а сфера її використання значно розширилася. Найбільші промислові компанії світу, включаючи Siemens та General Electric (GE), інвестували значні ресурси у напрям цифрових двійників, що забезпечило їх активне впровадження та інтеграцію в різні галузі промисловості [31].

Цифровий двійник є технологічною системою, що поєднує в собі багатофізичні, багатомасштабні та міждисциплінарні характеристики. Його ключові особливості полягають у здатності до синхронізації з фізичним об'єктом у режимі реального часу, високої точності відображення та деталізованих параметрах, що дозволяє забезпечити тісну взаємодію та інтеграцію цифрового та матеріального середовища [32]. Використання цифрових двійників забезпечує наскрізне поєднання віртуального та реального світів завдяки застосуванню методів моделювання, аналізу та консолідації даних, можливості яких розширюються за рахунок штучного інтелекту та технологій обробки великих даних [33]. Ця технологія не лише спрощує поєднання виробничої інформації з фізичними процесами, а й відкриває широкі перспективи у розвиток інтелектуального виробництва. Практичні застосування цифрових двійників охоплюють такі галузі, як промисловість [34], охорона здоров'я [35], енергетика [36], «розумні» міста [37] та аерокосмічна галузь [38], сприяючи

зростанню ефективності, підвищенню продуктивності та стимулюванню інновацій.

Технологія цифрових двійників займає ключове місце у розвитку інтелектуального виробництва, оскільки дозволяє формувати деталізовані віртуальні моделі виробництв і систем технічного обслуговування засобів морського транспорту [18]. Застосування таких моделей сприяє моделюванню та оптимізації виробничих процесів, виявленню потенційних ризиків та відкриттю додаткових можливостей для їх удосконалення [19]. Завдяки цьому підприємства отримують можливість приймати більш зважені рішення у сфері планування виробництва та розподілу ресурсів, що підтверджується успішними практичними прикладами у різних секторах промисловості [20]. Впровадження сенсорних технологій, промислового інтернету, методів машинного навчання та інструментів аналізу даних у цифрові двійники формує замкнутий контур керування [22].

Для розрахунку теплообмінників і теплообмінного обладнання на ринках програмного забезпечення використовується багато різноманітних програм різних виробників. Серед них є програма AspenExchanger Design & Rating (EDR) [39] – це спеціалізований пакет програмного забезпечення від AspenTech для теплового та механічного проектування, моделювання та оцінки теплообмінників, що дозволяє знаходити оптимальні, економічно ефективні конфігурації, виконувати детальний аналіз та інтегруватися з симуляторами процесів. Серед них Aspen HYSYS та Aspen Plus. Програмне забезпечення допомагає оптимізувати конструкції теплообмінників, прогнозувати забруднення та забезпечувати відповідність галузевим стандартам, оптимізуючи як капітальні (CAPEX), так і експлуатаційні (OPEX) витрати [39]. Заслужує уваги і програма COMSOL. Вона дозволяє визначати багатовимірні температурні поля в різних елементах конструкцій, проводити розрахунки середовищ в теплообмінниках. Крім цього, вона не може бути використана для автоматичного перебирання великої кількості варіантів компонування конструкцій та режимних параметрів. Це, в першу чергу, потрібно в задачах оптимізації. Існує ряд програм, створених саме виробниками теплообмінного обладнання, які дозволяють розраховувати (в тому числі і оптимізувати) наданий ним сортамент обладнання. Наприклад, це програма фірми Alfa Laval, AlfaSelect© Designer, CAS 200, SHC тощо. Нажаль, глибина досліджуваних полів в цих програмах не дуже значна. Тому для реалізації поставленої задачі в частині засобів розрахунку і оптимізації пластинчастого теплообмінного обладнання враховувались тільки сильні сторони відомого програмного забезпечення і формувались інформаційні можливості цифрового двійника на основі суднової енергетичної установки [40-43].

Системно аналіз теплообмінного суднового обладнання виконаний в роботах [1, 4]. Суднові теплотехнічні системи в якості робочих середовищ суднової

енергетичної установки (СЕУ), як правило, використовують забортну або прісну воду, повітря, паливо, масло. На сьогоднішній день перспективними теплоносіями також є органічні [3]. Системи охолодження головних двигунів призначені для забезпечення відводу теплової енергії від деталей механізмів, пристроїв, приладів, а також робочих середовищ суднових теплообмінних апаратів [1]. У суднових дизельних установках використовуються одноконтурні, двоконтурні і трьохконтурні системи охолодження. У двоконтурних системах використовується поєднання прісної і забортної води, в трьохконтурних – охолодження відбувається в три етапи – високотемпературний, середньотемпературний і контур забортної води. Насоси системи охолодження забортної води використовуються для аварійного осушення машинного відділення або подачі води різним споживачам на судні [2].

Найбільш доцільним, доступним і поширеним охолоджуючим матеріалом (середовищем) на судні є вода. Широке застосування води також обумовлено суттєвою технологічною перевагою, високим коефіцієнтом тепловіддачі і високою теплоємністю, навіть, при використанні відносно невисоких швидкостей переміщення охолоджуючого середовища, а саме 0,5 ... 2,5 м/с [1, 5]. Забортну воду можливо використовувати тільки для технологічних задач і завдань, коли нагрівання води не буде перевищувати 45°C [1, 6]. Це пояснюється тим, що солі, які входять (містяться) до складу забортної морської води починають осідати на теплообмінні поверхні суднового обладнання. Також, крім розчинних солей, в забортній морській воді також можуть міститися різноманітні домішки, включення і мікроорганізми, які негативно впливають на технічну експлуатацію систем охолодження, а особливо – теплообмінного обладнання суднової енергетичної установки. Також прийнято забортну воду на судні використовувати для охолодження маслоохолоджувачів суднових систем мащення редукторів та підшипників суднового валопроводу тощо [2].

Мета статті

Метою даного дослідження є обґрунтування і системне урахування особливостей оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і суднової енергетичної установки.

Для досягнення цієї мети було визначено такі дослідницькі завдання: розробка моделі і інформаційної складної системи в реалізації відповідних задач дослідження, що дозволяє надалі досліджувати укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та суднової енергетичної установки; теоретичне та експериментальне обґрунтування реалізації досліджуваного застосування в частині практичних методів формування цифрового двійника для

представлення результатів роботи теплообмінного обладнання судна в реальних умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Для формування інформаційного підходу в частині оцінювання і прогнозування технічного стану судна, суднової енергетичної установки, механізмів, систем, обладнання в системі його експлуатації було використано системний підхід і метод формування системи експлуатації складної технічної системи – судна за технологією цифрових двійників. Попри великий потенціал, впровадження технології і механізмів цифрових двійників має низку проблем. Найскладнішими є об'єднання різних технологій, дотримання стандартів та забезпечення постійного збору даних. Для інтеграції моделювання, імітації, передачі даних і штучного інтелекту потрібен високий рівень цифровізації судна і суднової енергетичної установки. Важливу роль відіграє і кваліфікація персоналу: успіх часто залежить від професійного рівня і досвіду.

Також актуальними залишаються дослідження у сфері збору та обробки даних про фізичні об'єкти, їх об'єднання з цифровими моделями та розробка нових методів взаємодії реального і віртуального середовищ. Використання цифрових двійників у морській галузі вже має значний прогрес у тривимірному візуальному моніторингу виробничих і технологічних процесів. Їх застосування успішно розширюється не тільки в морській галузі, а й в автомобілебудуванні, авіаційній та машинобудівній галузях. Основним завданням є створення моделей, що точно відображають виробничі лінії, дозволяють збирати дані в реальному часі та забезпечують синхронізацію між фізичними та цифровими системами. Це дає можливість організувати ефективний інтелектуальний моніторинг.

Саме це питання авторами в статті розглядається

$$DL_{CSOSMP} = \sum_{i=1}^a SBS_i \cup \sum_{j=1}^b ESMDM_j \cup \sum_{k=1}^c AMS_k \cup \sum_{l=1}^d OSPP_l \cup \sum_{m=1}^f IDMS_m \cup \sum_{n=1}^h MICPI_n \cup \sum_{o=1}^r DSPI_o \cup \sum_{p=1}^s CCBS_p \cup \sum_{q=1}^t OCS_q \quad (1)$$

Формула є укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та судновою енергетичною установкою, де DL_{CSOSMP} означає цифрову систему управління експлуатацією вантажного судна та судновою енергетичною установкою [39, 43-46]. Ця модель служить комплексним цифровим представленням, що дозволяє системно здійснювати моніторинг, контролювати робочі процеси, експлуатацію, оптимізацію та прогнозування параметрів технологічних процесів вантажного судна і його енергетичної установки в режимі реального часу. Аббревіатури в формулі (1) мають наступні значення: SBS – модель блоку судна як засобу морського транспорту; ESMDM – модель блоку енергетичних систем, механізмів,

на основі системних рішень в практиці суднової енергетичної установки в реалізації застосування теплообмінних апаратів (для прикладу). Дослідження зосереджується на використанні цифрових двійників у інформаційній системі технічного обслуговування судна. Для цього через сенсори та системи збору даних забезпечується отримання інформації в реальному часі та одночасне відтворення поведінки об'єктів у цифрових моделях. Такий підхід дає змогу швидко візуалізувати процеси та проводити їх аналіз. Головна мета роботи – створення інформаційної моделі цифрового двійника для моніторингу, аналізу і прогнозування параметрів роботи і стану робочих процесів судових теплообмінних апаратів. Окрема увага приділяється результатам можливих варіантів спеціалізованої системи для аналізу роботи судових теплообмінних апаратів, яка може забезпечити нові рішення та стати основою для подальшого вдосконалення технічного обслуговування складових суднової енергетичної установки.

Спираючись на запропоновану професором Тао Ф. [39, 42, 43] структуру для формування моделі цифрового двійника для побудови інтелектуальної системи експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки, у складі п'ятивимірної структури цифрових двійників, що включає безпосередньо фізичний об'єкт, віртуальну модель, дані двійника, систему обслуговування і зв'язок. Це дослідження присвячене роботі, вдосконаленню та керуванню питаннями експлуатації теплообмінних апаратів у центральній системі охолодження головного двигуна судна й спрямоване на створення точної моделі цифрового двійника для підвищення ефективності експлуатації вантажного судна та його енергетичної установки.

Модель цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та судновою енергетичною установкою описано наступним чином (1):

пристроїв та засобів; AMS – модель блоку допоміжних механізмів та систем; OSPP – модель блоку роботи судна та його енергетичної установки; IDMS – модель блоку інтелектуальної системи прийняття рішень з точки зору технічної експлуатації судна та його енергетичної установки; MICPI – модель блоку моніторингу, ідентифікації, збору та обробки інформації; DSPI – модель блоку бази даних, зберігання та обробки інформації; CCBS – модель центрального блоку керування судном та його енергетичною установкою та OCS – модель блоку умов експлуатації судна та його енергетичної установки. Змінні в формулах a, b, c, d, f, h, r, s та t відповідають значенням кожної запропонованої моделі блоку системи.

Основні процеси вирішення поставлених і схожих

задач базуються, як правило, на реалізації системної взаємодії трьох основних взаємопов'язаних складових наукового дослідження: процесної (предметної), інформаційної (і комунікаційної) та аналітичної. Для урахування всіх основних особливостей оцінювання і прогнозування стану судових теплообмінних апаратів, обладнання у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і судової енергетичної установки та функціонування процесної (предметної) складової й аналітичної складової реалізується інформаційна і комунікаційна (в одній підсистемі) складова. Вона передбачає забезпечення комплексу заходів ідентифікації судна, енергетичної установки, двигунів, теплообмінних апаратів тощо, засобів автоматики, засобів інфраструктури, реалізації робіт в частині технічного обслуговування обладнання і управління процесами їх проведення, контроль наявності і управління процесами забезпечення запчастин і витратних матеріалів, моніторинг технічного стану обладнання (в тому числі теплообмінних апаратів) і витрати палива судном, викидів, а також збирання і

зберігання отриманих результатів в умовах взаємодії з інформаційним середовищем.

Процес оцінювання і прогнозування параметрів працездатності та технічного стану обладнання й судових теплообмінних апаратів, як складових в системі експлуатації, на основі технології цифрових двійників, інформаційної системи і інтелектуальних транспортних складових компонентів і систем передбачають уточнення інформації про реальний технічний стан судна (судової енергетичної установки, механізмів систем тощо) у змінних умовах експлуатації при реалізації системної взаємодії складових (в тому числі зміна значущих параметрів технічного стану, зміни температур, тисків, витрати палива і технологічних рідин тощо), методи й засоби їх реалізації, про витрату палива судна тощо. Вище викладену задачу можливо виразити, як складну функцію на основі інформації про параметри технічного стану в реалізаціях відповідних задач наукових досліджень, що можуть бути показані у відповідності до основних елементів і складових у рівнянні (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{SMIs p} \left(\overline{H}_{SMi}, t, \Delta t, \overline{X}_i(t - n\Delta t), \overline{X}_i(t), \dots, \overline{X}_i(t - \Delta t), DR_{Lti} \right) = S_{OSPP}; \\ S_{OSPP} = \Omega_i^{k_i} (e_{SM}, r_i)^j; \\ S_{OSPP} = F_{OSPP} (S_{OSPS}; S_{OSPL}; S_{OSPM}); \\ S_{OSPP} = F_{OSPP} \left((M_{i1i}, M_{i2i}, M_{i3i}, M_{i4i}, M_{i5i}, M_{i6i}, M_{i7i}); (T_{SMIs pi}, P_{DUi}) \right); \\ M_{i1i} = F_{i1i} \left(\overline{X}_{SMI1spi}(t) \right); \\ M_{i2i} = F_{i2i} \left(\overline{X}_{SMI2spi}(t) \right); \\ M_{i3i} = F_{i3i} \left(\left(\overline{X}_{SMI13spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI23spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI33spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI34spi}(t) \right) \right); \\ M_{i4i} = F_{i4i} \left(\overline{X}_{SMI4spi}(t) \right); \\ M_{i5i} = F_{i5i} \left(\overline{X}_{SMI5spi}(t) \right); \\ M_{i6i} = F_{i6i} \left(\left(\overline{X}_{SMI16spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI26spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI36spi}(t) \right) \right); \\ M_{i7i} = F_{i7i} \left(\overline{X}_{SMI7spi}(t) \right); \\ T_{SMIs pi} = F_{SMIs pi} \left(\left(\overline{X}_{SMIs pti}(t) \right); DR_{Lti} \right); \\ P_{DUi} = F_{DUi} \left(\overline{X}_{DUiti}(t) \right); \\ P_{esmpi}(t) = F \left(F_{SMIs p}, DR_{Lti}, S_{OSPP}, P_{DUi} \right) \rightarrow \max; \\ E_{mcosmpi}(t) = F \left(F_{SMIs p}, S_{OSPP} \right) \rightarrow \max; \\ E_{ufpfcsi}(t) = F \left(F_{SMIs p}, DR_{Lti}, S_{OSPP}, P_{DUi} \right) \rightarrow \max. \end{array} \right.$$

де $F_{SMIs p}$ – інформація системи про параметри стану і експлуатації вантажного судна (судової енергетичної установки тощо) у змінних умовах

виробничої експлуатації при системній взаємодії складових (в тому числі зміна значущих параметрів технічного стану, зміни температур, тисків, витрат палив і

технологічних рідин тощо); $\bar{H}_{SM_i}$ – вектор органа (ів) керування судновою енергетичною установкою, судном, двигуном тощо в поточному t часі; t – параметр поточного часу; Δt – інтервал часу (крок) між вимірюваннями; n – кількість інтервалів часу (кроків) у минулому; $\bar{X}_i(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – поточні параметри зміни робочих і технологічних процесів і характеристик технічного стану і експлуатації вантажного судна (суднової енергетичної установки тощо) в процесах моніторингу у змінних умовах експлуатаційної взаємодії у встановлені моменти часу. Ці параметри виміряні і входять до переліку ретроспективних факторів (зміна значущих параметрів технічного стану, зміни температур, тисків, витрати палива і технологічних рідин тощо) експлуатації вантажного судна, суднової енергетичної установки тощо. Це саме поточні значення і параметри моделі цифрового двійника інтелектуальної системи; i – фіксовані встановлені вимірювальні параметри і характеристики стану і експлуатації вантажного судна (суднової енергетичної установки тощо) у змінних умовах експлуатації; $DR_{L_{ti}}$ – несправності (код, статус, параметри несправності за результатами ідентифікації) вантажного судна, суднової енергетичної установки тощо у змінних умовах експлуатації на основі результатів їх визначення і ідентифікації; S_{OSPP} – багаторозмірний показник – система забезпечення функціонування моделі цифрового двійника інтелектуальної системи експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки в залежності від поставлених задач. У розглянутому випадку система S_{OSPP} – це відображення властивостей складових елементів (задач, підоб'єктів) e_{SM} і їх r_i відношень для k_i варіантів в частині J в l , підоб'єктів отримання інформації і підоб'єктів забезпечення системи експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових (за поставленими задачами); Ω – оператор зв'язку (відображення для системи); k_i – кількість засобів для отримання інформації про параметри технічного стану і експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки; l – зв'язки між основними складовими елементами і засобами спостереження та самими об'єктами для забезпечення експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових (за поставленими задачами); e_{SM} – множина задач (підоб'єктів) забезпечення експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових (за поставленими задачами); r_i – множина відношень між складовими; j – завдання для функціонування, для оперативного контролю і для управління; F_{OSPP} – інформація про параметри основних процесів експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових в умовах експлуатації за поставленими задачами. Це завершений продукт органічного

поєднання складових як об'єктивних, так і суб'єктивних факторів експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки; S_{OSPS} – складова функції для забезпечення системи інформацією про параметри технічної експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки що базується на основі серверних рішень виконання процесів моніторингу, ідентифікації, збирання і обробки інформації; S_{OSPL} – складова функції для забезпечення системи інформацією про процеси застосування за призначенням і експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки що базується на основі локального джерела інформації виконання моніторингу (за поставленими задачами); S_{OSPM} – складова функціоналу забезпечення системи інформацією про експлуатацію вантажного судна та суднової енергетичної установки на основі мережевих баз даних виконання системного моніторингу; F_{i1i} – набір інформації про параметри нормування основних технічних, технологічних, часових параметрів експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; F_{i2i} – набір інформації про параметри зміни масо-вагових параметрів експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; F_{i3i} – набір інформації про параметри умов експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки. Враховуються наступні складові у змінних умовах експлуатації у взаємодії з навколишнім середовищем і інфраструктурою: умови водного середовища, умови транспортні, умови природно-кліматичні і умови культури праці; F_{i4i} – набір інформації про параметри виробничої експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; F_{i5i} – набір інформації про параметри технічної експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; F_{i6i} – набір інформації про параметри стану вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових до, під час і після проведення технічних впливів; F_{i7i} – набір інформації про параметри особливостей технічного обслуговування вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; F_{SMIspi} – набір інформації про окремі параметри технічного стану і параметри експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; F_{DUi} – набір інформації про параметри режимів управління вантажним судном, судновою енергетичною установкою та їх складовими; $\bar{X}_{SM1spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри нормування основних технічних, технологічних, часових параметрів (M_{i1i}) експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; $\bar{X}_{SM2spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри зміни масо-вагових параметрів (M_{i2i}) експлуатації вантажного судна та суднової

енергетичної установки тощо; $\bar{X}_{SMI13spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI23spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI33spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI34spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри умов експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки з відповідними складовими (M_{i3i}): умови водного середовища, умови транспортні, умови природно-кліматичні і умови культури праці у взаємодії з інфраструктурним середовищем, що виміряні і входять до переліку ретроспективних факторів; $\bar{X}_{SMI4spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри виробничої експлуатації (M_{i4i}) вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; $\bar{X}_{SMI5spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри технічної експлуатації (M_{i5i}) вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; $\bar{X}_{SMI16spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI26spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI36spi}(t)$ – при $i = 1, \dots, m$ – параметри стану (M_{i6i}) вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових відповідно до, під час і після проведення технічних впливів; $\bar{X}_{SMI17spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри особливостей технічного обслуговування (M_{i7i}) вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; $\bar{X}_{SMIspi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – окремі параметри (T_{SMIspi}) технічного стану і параметри експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; $\bar{X}_{DUit}(t)$ – при $i = 1, \dots, m$ – параметри режимів (P_{DUi}) управління вантажним судном, судновою енергетичною установкою та їх складовими, в тому числі саме в частині технічної експлуатації і технічного обслуговування; P_{esmpi} – ефективність експлуатації судна і суднової енергетичної установки; $E_{mcosmpi}$ – ефективність проведеного технічного обслуговування судна і суднової енергетичної установки; E_{upfcsi} – ефективність використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин тощо.

Для оцінювання і прогнозування параметрів працездатності і технічного стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників інформаційна система повинна бути адаптована в умовах експлуатації на сталу роботу з отримання поточних даних. Аналітична складова

системи за технологією цифрових двійників призначена для оцінки всіх граничних значень, формування раціональних і оптимальних характеристик та прогнозування значень параметрів технічного стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації та забезпечення взаємодії з іншими системами транспортного судна і суднової енергетичної установки. Також аналітична складова системи виконує дії для розрахунково-аналітичного формування відповідної складової виконання сталого контролю і, в цілому, для забезпечення технічного стану вантажного транспортного судна, його енергетичної установки та в окремих складових, компонентах, механізмах і системах при відтворенні процесів забезпечення всіх складових ефективностей експлуатації, проведення технічних обслуговувань та в частині використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин тощо [11, 13, 43].

Цільовою функцією дослідження ($Q_{\Sigma}(t)$), а саме процесів підвищення ефективностей експлуатації ($Q(P_{esmpi}(t))$), проведення технічних обслуговувань ($Q(E_{mcosmpi}(t))$) та в частині використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин в умовах експлуатації ($Q(E_{upfcsi}(t))$), буде вважатись поєднання як об'єктивних, так і суб'єктивних експлуатаційних факторів експлуатації суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників. Це забезпечує забезпечують працездатність всієї енергетичної системи судна і суднової енергетичної установки саме через мінімальне значення витрати палива (G_{Pt}). Об'єктивні фактори залежать від особливостей теплообмінників в частині: конструктивного виконання, площ теплообміну (кількості і якості пластин теплообмінника), витрати теплоносіїв (масову витрату в об'ємну витрату), коефіцієнтів тепловіддачі, товщини забруднення пластинчастого теплообмінника, швидкості теплообміну тощо. Суб'єктивні фактори системи залежать від технічного стану обладнання суднових теплообмінних апаратів, суднової енергетичної установки і судна взагалі, та режимів управління, експлуатації, технічного обслуговування тощо. Крім цього функція повинна забезпечувати поєднання з іншими частинами запропонованого підходу.

Запропоновану функцію дослідження можливо представити у вигляді:

$$\begin{cases} Q_{\Sigma}(t) = \Sigma(Q(P_{esmpi}(t)) + Q(E_{mcosmpi}(t)) + Q(E_{upfcsi}(t))) \rightarrow \max \\ Q(P_{esmpi}(t)) = F(F_{SMIsp}, DR_{Lt_i}, S_{OSPP}, P_{DUi}) \rightarrow \max \\ Q(E_{mcosmpi}(t)) = F(F_{SMIsp}, S_{OSPP}) \rightarrow \max \\ Q(E_{upfcsi}(t)) = F(F_{SMIsp}, DR_{Lt_i}, S_{OSPP}, P_{DUi}) \rightarrow \max \\ G_{Pt} \rightarrow \min \end{cases} \quad (2)$$

Особливістю запропонованої функції є те, що при її реалізації одночасно вирішується мінімалістична і максималістична, тобто мінімаксна, задача. Вирішуються одночасно такі задачі: забезпечення технічного стану $Q_{i\pi}(t)$ вантажного транспортного судна, його енергетичної установки та в окремих складових, компонентах, механізмах і системах при відтворенні процесів гарантування ефективності експлуатації, проведення технічних обслуговувань та в частині використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин тощо прагне досягти максимуму, при тому що G_{pi} прагне досягти мінімально можливих значень. При урахуванні факторів, що впливають на досягнення вказаних параметрів, можливо виділити конструкційні фактори і особливості вантажного транспортного судна, його енергетичної установки та в окремих складових, компонентах, механізмах і системах, їх технічний стан, фактичні умови експлуатації і режими управління (обслуговування і ремонту). Кожен з основних факторів впливу має суттєві особливості у своєму складі. Заходи в частині оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації повинні бути оптимізовані в частині технологічних налаштувань, технічного стану, процесів технічних обслуговувань, відновлення працездатності тощо і по завершенні повинні також мінімізовані у часі і витраті матеріалів і запасних частин на їх відновлення. Для використання в дослідженні методів і засобів дистанційного моніторингу планується виконати також аналіз особливостей його реалізації та дистанційного контролю параметрів технічного стану й визначення критеріїв покращення реалізації поставлених завдань в частині самих теплообмінних апаратів в умовах експлуатації засобами оперативного контролю на основі інтелектуальних і комунікаційних технологій. У процесі оцінювання і прогнозування параметрів працездатності і технічного стану суднових теплообмінних апаратів в системі їх експлуатації на основі технології цифрових двійників інформаційна система передбачає уточнення інформації про фактичний технічний стан суднових теплообмінних апаратів, методи й засоби їх оцінювання і прогнозування параметрів працездатності, про перспективи їх застосування при зміні умов експлуатації тощо.

Особливості реалізації оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників. В статті об'єктом досліджень була суднова енергетична установка судна-танкера «Sti Fulham» (номер IMO 9688374, номер MMSI 538005400), яке призначено для перевезення нафти та хімікатів [40-42]. Суднова енергетична установка включає головний двигун 6S50ME-B. Досліджувані теплообмінні апарати судової енергетичної установки розглядалися для центральної системи охолодження головного судового двигуна [41-43].

Для запобігання занадто високої температури

охолоджуючого середовища повітреохолоджувача головного двигуна, розрахункова температура охолоджуючої води центральної системи охолоджуючої води повинна бути не вище 36°C. Це відповідає найвищій температурі для заборотної морської води + 32°C [18-21, 41-43].

За рекомендаціями виробників [41, 43] для збереження сталої температури охолоджуючої води на вході в повітроохолоджувачі головного двигуна потрібно забезпечувати застосування як тільки максимально можливо нижчої температури рідини в центральній системі охолодження. Це означає, що температура охолоджуючої води системи на центральному регулюючому клапані повинна бути встановлена на мінімум 10°C нижче від температури заборотної морської води [42]. Тобто різниця температур не повинна перевищувати +10°C. При цьому виробник для всіх трубопроводів системи охолодження встановлює максимальні швидкості охолоджуючої води системі ~3,0 м / с.

Для реалізації функціоналу дослідження (2) дослідження проводились за 3 послідовними взаємопов'язаними етапами на створеній математичній моделі на основі технології цифрових двійників. Для дослідження спроможності пластинчастого теплообмінника центральної системи охолодження забезпечити експлуатацію головного двигуна судової енергетичної установки для складних (змінних) умов експлуатації судна, а саме при переході в районах плавання (для прикладу): Північне море – Арабські Емірати, Перська затока. В такому випадку температура заборотної води змінюється в діапазоні від +15°C взимку до +36°C влітку (1-й етап). При цьому досліджувались граничні температури в центральній системі і вплив на її забезпечення конструктивних особливостей судового пластинчастого теплообмінника (2-й етап дослідження). Крім цього, проводилось дослідження можливого застосування системи в зоні теплообмінника і пошук шляхів забезпечення роботи пластинчастого теплообмінника при можливому забрудненні (3-й етап дослідження) [41, 43].

На початковому етапі при формуванні цифрового двійника теплообмінного апарата здійснюємо аналітичне обґрунтування і розрахунок технологічних параметрів судового пластинчастого теплообмінника системи охолодження головного судового двигуна. Початкові дані обираємо із відомих початкових і вихідних даних і результатів моніторингу технологічних параметрів технічного стану компонентів системи охолодження та оточуючого середовища. Технологічний розрахунок проводиться за положеннями [4, 17-23, 41-43]. Після отримання результатів технологічного розрахунку і визначення (підтвердження) конструктивного виконання досліджуваного теплообмінника виконуємо моделювання процесів експлуатації пластинчастого теплообмінника для дослідження експлуатаційних режимів роботи [4, 41-43]. Дослідження проводимо на основі отриманих вихідних даних і за методом послідовних наближень (МПН). Розрахунки

будуються за допомогою залежностей, в які входить не середня різниця температур між теплообмінними потоками (середній логарифмічний температурний напір $\Delta t_{\ln}$), а різниця температур гріючого і нагрітого теплоносія на вході в теплообмінник [4, 17-23]. Для цього використовуємо коефіцієнт протічності Z , який знаходимо з рівняння теплового балансу і рівняння теплопередачі. Потім визначаємо фактичну теплову потужність пластинчастого теплообмінника і фактичні температури теплоносія на виході [4, 17-23]. З урахуванням змінних температур знаходимо коефіцієнти тепловіддачі і нове значення коефіцієнта k_{new} теплопередачі [4, 17-23]. За нових значень k_{new} цикл моделювання повторюється. При рівності $k = k_{\text{new}}$, при наступній ітерації цикл методу послідовних наближень припиняється; значення, отримані на даному етапі, є реальними значеннями теплообмінного апарату [4]. При прогнозуванні параметрів теплообмінного обладнання за технологією цифрових двійників проводимо моделювання режимів роботи теплообмінника за відповідний період часу при різних температурах забортної води при заданих параметрах суднової енергетичної установки [4, 42].

Для урахування забруднення в теплообміннику системи охолодження в моделі попередньо враховані і проведені необхідні розрахунки для роботи теплообмінника та внесені відповідні зміни та доповнення до формули визначення коефіцієнта тепловіддачі [4]. Під забрудненням в дослідженні розуміємо накопичення небажаних відкладень на теплообмінних поверхнях суднових теплообмінних апаратів. Наявність таких відкладень створює опір тепловому потоку, а отже, знижує ефективність роботи обладнання та викликає надмірну витрату палива [4, 40]. Найнебезпечнішими з цієї точки зору є забруднення з низькою теплопровідністю [4]. На основі розробленої моделі та програми цифрового двійника отримано дані, які дозволяють візуально оцінити вплив можливого забруднення на коефіцієнт k при його зміні (негативні наслідки) під час роботи теплообмінника. Знання характеристик завищення коефіцієнта необхідно для того, щоб в умовах експлуатації можна було передбачити негативні наслідки досягнення його відповідних (небажаних) значень [4, 17-23]. З математичної точки зору можливо розглядати вплив різних видів забруднень на коефіцієнт теплопередачі k . Для цього при обчисленні k додається додатковий опір – опір теплопередачі шару забруднення [4, 17-23]. Сформована математична модель на основі технології цифрових двійників пластинчастого теплообмінника дозволяє не тільки моделювати його роботу, а й оцінювати, аналізувати роботу і прогнозувати стан теплообмінників в реальних умовах експлуатації. Отримані графічні залежності добре корелюють з реальністю (рис. 1) [4, 41-43]. В основних обчислювальних дослідженнях виконувались такі дослідницькі завдання: перевірка технологічної спроможності робочого процесу пластинчастого теплообмінника відповідно до встановлених термодинамічних умов експлуатації

(найбільш напружений); визначення і оцінювання термодинамічних характеристик і технологічної спроможності робочого процесу вибраного в заданому режимі пластинчастого теплообмінника [4, 41-43]; прогнозування термодинамічних характеристик пластинчастого теплообмінника, вибраного в новому режимі [4, 41-43].

У процесі виконання дослідження і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників, для умов прикладу наведеного вище, з'ясували вплив підвищення теплопередачі, температури води на вході на основні технологічні показники роботи пластинчастого теплообмінника (рис. 1). Також на рис. 1 наведені апроксимуючі рівняння для кожного варіанту дослідження для прогнозування можливих результатів в умовах експлуатації теплообмінного обладнання. З результатів розрахункового дослідження видно, що підвищення температури води забортної морської при вході в теплообмінник призводить до істотних наслідків [4, 41-43].

Також на рис. 1 наведені апроксимуючі рівняння для кожного варіанту дослідження для прогнозування можливих результатів в умовах експлуатації теплообмінного обладнання. З результатів розрахункового дослідження видно, що підвищення температури води забортної морської при вході в теплообмінник призводить до істотних наслідків [4, 41-43].

Розрахунок проводився з інтервалом температури охолоджуючої рідини 1°C , яка змінювалась на вході в теплообмінник, а саме в його «холодну» частину. Інтервал досліджуваних температур – $+32 \dots +35^{\circ}\text{C}$ (виходячи з технологічних і експлуатаційних вимог виробника СЕУ). В першу чергу досліджувався вплив температур на стабільність експлуатаційних показників системи охолодження. На рис. 1 показані зміни масової витрати теплоносія (а) і втрат тиску (б) в процесі зміни температури на впуску «холодного» теплоносія. Результати дослідження показали, що для теплообмінника зміна (підвищення значень) параметрів впускної «холодної» води призведе до збільшення масової витрати теплоносія особливо в діапазоні температур після 34°C . Аналогічні результати отримані і для втрат тиску в теплообміннику, що підтверджується рис. 1, б.

На рис. 1 показані зміни запасу поверхні на забруднення (е) і максимальної кількості пластин в теплообміннику (г) в процесі зміни температури на впуску «холодного» теплоносія. Це, в свою чергу, суттєво впливає на забруднення теплообмінних поверхонь (рис. 1, е), на зниження швидкості руху робочої рідини в каналах (рис. 1, в) оцінці тиску (рис. 1, б). При цьому наочно видно, що коефіцієнт теплопередачі (рис. 1, д) суттєво зменшується. Виходом із описаної ситуації може бути заздалегідь проведене технічне обслуговування теплообмінника зі збільшенням кількості пластин (збільшенням площі теплообмінної поверхні). Такий варіант, безумовно, дозволить уникнути складну технологічну ситуацію [4, 41-43].

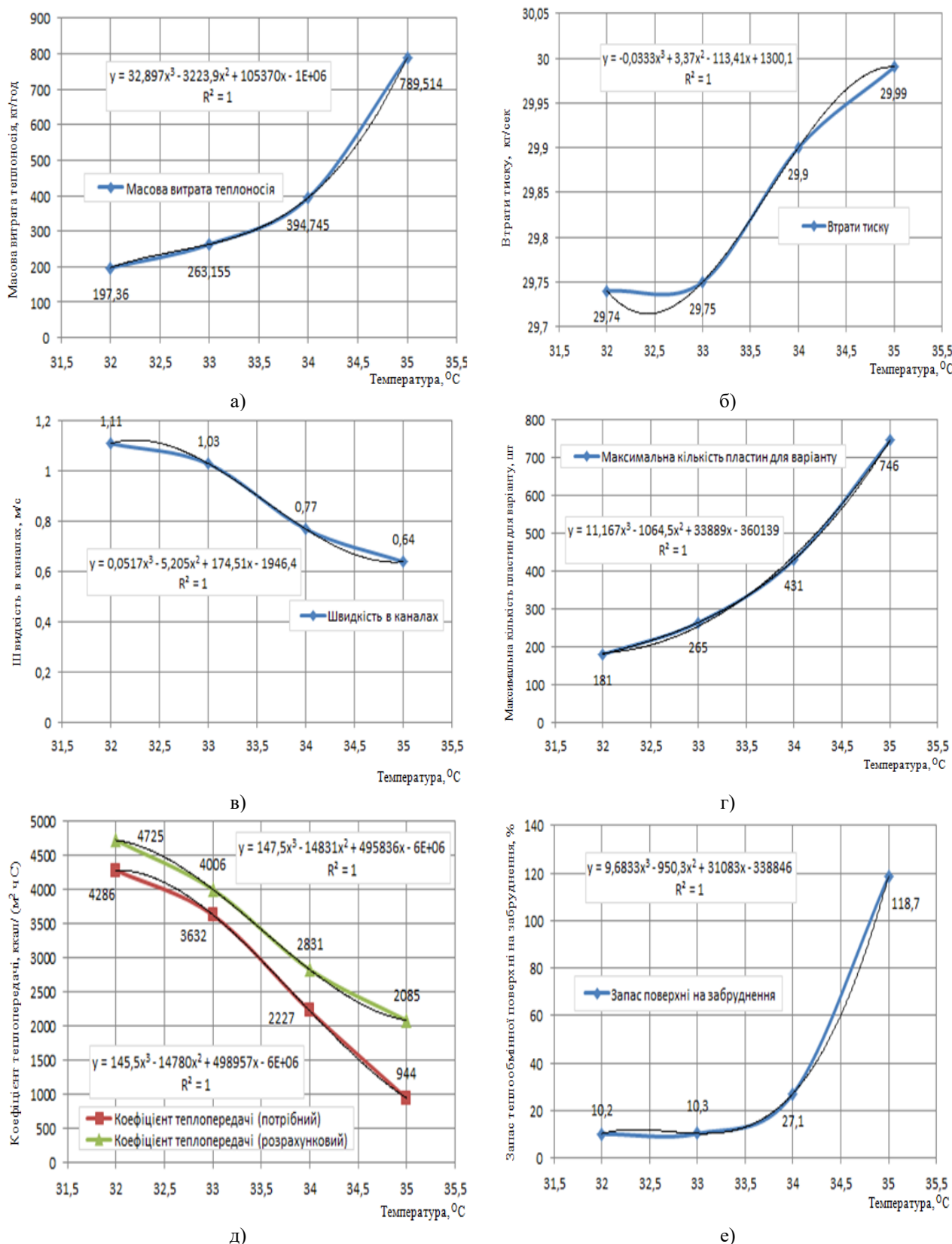


Рис. 1 – Результати розрахункового дослідження суднового пластинчастого теплообмінника в частині зміни: масової витрати теплоносія (а); витрати тиску (б); швидкості в каналах (в); максимальної кількості пластин в пакеті (г); зміни коефіцієнту теплопередачі теплообмінника (д) і запасу теплообмінної поверхні на забруднення (е)

В перспективі планується удосконалити модель для оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників з метою урахування плану технічних обслуговувань, оцінювання ресурсу теплообмінників при роботі в складних умовах експлуатації тощо.

Висновки

Обґрунтовані і системно ураховані особливості оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і суднової енергетичної установки.

Розроблена модель і інформаційна складна система в реалізації задач дослідження, що дозволяє надалі досліджувати укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та суднової енергетичної установки.

Теоретично та експериментально обґрунтовані реалізації досліджуваного застосування в частині практичних методів формування цифрового двійника для представлення результатів роботи теплообмінного обладнання судна в реальних умовах експлуатації.

Перелік використаних джерел

- [1] Zohuri B. Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation. Switzerland : Springer International Publishing, 2017. 559 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29835-1>.
- [2] Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2019. Article 2019-01-0906. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0906>.
- [3] Черняк Ю.В., Прилепський Ю.В., Грицук І.В. Фізична модель рекуперативної системи маневрового тепловозу. Донецьк: ДонІЗТ, 2010. 196 с.
- [4] Мікульонюк І. О. Інноваційне теплообмінне обладнання : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 140 с.
- [5] Теплообмінники з псевдозрідженням сипкого матеріалу (Огляд конструкцій) / Мікульонюк І. О., Карвацький А. Я., Іваненко О. І., Лелека С. В. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»* : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2022. № 3(21). С. 23-38. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265359>.
- [6] Mikulionok I. O. Plate-Type Gas Distribution Grids for Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57, № 1-2. Pp. 168-175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00911-2>.
- [7] Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel / A. Golovan et al. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019. Pp. 390-393. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896595>.
- [8] The Choice of a Rational Type of Fuel for Technological Vehicles / V. Zaharchuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1759. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1759>.
- [9] Cognitive Model of the Internal Combustion Engine / V. Vychuzhanin et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1738. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
- [10] The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1773. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
- [11] Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів / В.П. Матейчик та ін. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2014. Випуск 13. С. 126-138.
- [12] Increase of Stability for Motor Cars in Service Braking / M. Podrigalo et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1880. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1880>.
- [13] Information and analytical system to monitor operating processes and environmental performance of vehicle propulsion systems / Mateichyk V., Sága M., Smieszek M., Tsiuman M. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 776(1). Article 012064. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/776/1/012064>.
- [14] Assessment of Operation Speed and Precision of Electropneumatic Actuator of Mechanical Transmission Clutch Control System / M. Mikhalevich et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1295. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1295>.
- [15] The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact / I. Kuric et al. *MATEC Web of Conferences. Innovative Technologies in Engineering Production*. 2018. Vol. 244. Article 03003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403003>.
- [16] Організація технічної експлуатації автомобілів в умовах формування інтелектуальних транспортних систем / В.П. Волков та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2013. № 29(1002). С. 138-144.
- [17] Головань А. І. Перспективні напрямки та інноваційні підходи управління системою технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*. 2023. Вип. 2(17). С. 42-55. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.04>.

- [18] Головань А. Формування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден за рахунок цифрових стратегій. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 47. С. 297-305. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300116>.
- [19] Головань А. І. Методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*. 2023. Вип. 3(18). С. 113-122. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.09>.
- [20] Головань А. І. Концептуальна модель планування та оптимізації графіків технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*. 2023. Вип. 1(37). С. 107-115. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12>.
- [21] Головань А. І. Дослідження впливу комплексної прескриптивної системи та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*. 2024. Вип. 1(39). С. 112-123. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.11>.
- [22] Головань А. Формування цифрових стратегій для вирішення задач підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 46. С. 149-158. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288184>.
- [23] Головань А. І. Особливості оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. Вип. 1(75). С. 5-10. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005>.
- [24] Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review / J. Leng et al. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 60. Pp. 119-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>.
- [25] Improving material quality management and manufacturing organizations system through Industry 4.0 technologies / M. Ammar et al. *Materials Today Proceedings*. 2021. Vol. 45. Pp. 5089-5096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.585>.
- [26] Caiza G., Sanz R. An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Article 4125. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14104125>.
- [27] Wan J., Chen B., Wang S. Smart Manufacturing Factory: Artificial-Intelligence-Driven Customized Manufacturing. 1st ed. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2023. 470 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003460992>.
- [28] Grieves M. W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*. 2005. Vol. 2. Pp. 71-84. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>.
- [29] Grieves M. W. Product Lifecycle Management. Nova Iorque, Brazil : McGraw-Hill, 2006. 319 p.
- [30] Grieves M. W. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management. Cocoa Beach, FL, USA : Space Coast Press, 2011. 382 p.
- [31] Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research / Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 108952-108971. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
- [32] Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues / Y. Lu et al. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 61. Article 101837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>.
- [33] Reinforcement learning and digital twin-based real-time scheduling method in intelligent manufacturing systems / Zhang L., Yan Y., Hu Y., Ren W. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55, iss. 10. Pp. 359-364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.413>.
- [34] Tian L., Liu G., Liu S. Digital twin and production line simulation technology. *J. Graph*. 2021. Vol. 3. Pp. 349-358.
- [35] Digital-Twin-Assisted Optimization of Intelligent Manufacturing Flexible Production Line with Automated Guided Vehicle / R. Xiao et al. *Proceedings of the 2023 42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, 24-26 July 2023. Pp. 5174-5179. DOI: <https://doi.org/10.23919/CCC58697.2023.10240458>.
- [36] A digital twin framework for prognostics and health management / M. Toothman et al. *Computers in Industry*. 2023. Vol. 150. Article 103948. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103948>.
- [37] Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data / F. Tao et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 94. Pp. 3563-3576. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.
- [38] Mahomed A. S., Saha A. K. Unleashing the Potential of 5G for Smart Cities: A Focus on Real-Time Digital Twin Integration. *Smart Cities*. 2025. Vol. 8. Article 70. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities8020070>.
- [39] Digital twin and its potential application exploration / F. Tao et al. *Computer Integrated Manufacturing Systems*. 2018. Vol. 24. Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.13196/j.cims.2018.01.001>.
- [40] Интеграция технической эксплуатации автомобилей в структуры и процессы интеллектуальных транспортных систем: монография / В.П. Волков та ін. Донецк : Изд-во «Ноулидж», 2013. 398 с.
- [41] STI FULHAM. URL: <https://www.balticshipping.com/vessel/imo/9688374> (дата доступу: 15.06.2025).
- [42] MAN B&W S50ME-B9.3-TII. IMO Tier II. Project Guide. 2014. 302 p.

- [43] STI FULHAM. IMO number: 9688374. STI FULHAM - DNV GL Vessel Register. 13.11.2021. 5 p.
- [44] Design and simulation of heat exchangers using Aspen HYSYS, and Aspen exchanger design and rating for paddy drying application / J. Janaun et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Chemical and Bioprocess Engineering*, Kota Kinabalu, Malaysia, 9-12 December 2015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/36/1/012056>.
- [45] Garcia S., Trueba A. Fouling in heat exchangers. *Inverse Heat Conduction and Heat Exchangers*. London, UK: Intechopen Edition, 2019. Pp. 1-27. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.88079>.
- [46] Industrial heat exchanger: Operation and maintenance to minimize fouling and corrosion / T. K. Hou et al. *Heat Exchangers – advanced Features and Applications*. London, UK : Intechopen Edition, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/66274>.

FEATURES OF ASSESSMENT AND PREDICTION OF THE CONDITION OF SHIP HEAT EXCHANGERS IN THE OPERATION SYSTEM BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

Gritsuk I.V.	D.Sc. (Engineering), professor, Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7065-6820 , e-mail: gritsuk_iv@ukr.net ;
Khudyakov I.V.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson; Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8900-7879 , e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com ;
Pogorletskyi D.S.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson; Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053 , e-mail: dimon150582@gmail.com ;
Chernenko V.V.	senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2013-7058 , e-mail: v.chernenko18@gmail.com ;
Kotov A.I.	senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7648-023X , e-mail: kotovai055@gmail.com ;
Zadorozhnii V.K.	master's student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0118-1654 , e-mail: zadorozhnii.volodymyr.mmm@gmail.com

One of the main directions for improving marine power plants is to increase their efficiency in the processes of heat energy conversion within individual system components. These processes are governed by the laws of thermodynamics, fluid dynamics, and heat and mass transfer, and they determine the efficiency coefficient of the installation, the amount of heat and harmful emissions, service life, as well as the compactness and overall performance of the systems. Heat exchangers, as essential components of power plants, play a crucial role in shaping these indicators. The need for improvement of ship power plant equipment and heat exchangers has been substantiated, which defines the practical demand for the development, enhancement, and implementation of scientific and technical solutions aimed at intensifying heat transfer processes under ship operating conditions. The features of assessment and prediction of the state of marine heat exchangers in operation are justified and systematically considered, based on the digital twin technology of cargo vessels and ship power plants. A model and an information-based complex system have been developed for addressing the research tasks. This allows further investigation through an aggregated model representing the digital twin of an intelligent management system for the operation of cargo vessels and ship power plants. The theoretical and experimental justification for the studied application has been provided, focusing on practical methods for forming a digital twin to represent the performance of ship heat exchange equipment under real operating conditions. An example of applying this method to an actual ship heat exchanger is presented.

Keywords: information model, digital twin, heat exchanger, cooling system, ship power plant, model, complex system.

References

- [1] B. Zohuri, *Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation*. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. doi: [10.1007/978-3-319-29835-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29835-1).
- [2] I. Gritsuk et al., "Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators," *SAE Technical Paper*, article 2019-01-0906, 2019. doi: [10.4271/2019-01-0906](https://doi.org/10.4271/2019-01-0906).
- [3] Yu.V. Cherniak, Yu.V. Prylepsykyi, and I.V. Gritsuk, *Fizychna model rekuperatyvnoi systemy manevrovoho teplovozu* [Physical model of the regenerative system

- of a shunting diesel locomotive]. Donetsk, Ukraine: DonIZT, Publ. 2010. (Ukr.)
- [4] I.O. Mikulonok, *Innovatsiine teploobminne obladnannya : monohrafiia* [Innovative heat exchange equipment: monograph]. Kyiv, Ukraine: KPI im. Ihoria Sikorskoho Publ., 2023. (Ukr.)
- [5] I.O. Mikulionok, A.Ya. Karvatskii, O.I. Ivanenko, and S.V. Leleka, "Teploobminnyky z psevdozriddzhenniam sypkoho materialu (Ohliad konstrukttsii)" ["Heat exchangers with fluidization of bulk material (Design review)"], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho» : ser. «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozbezhezhennia» – Bulletin of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»*, № 3(21), pp. 23-38, 2022. doi: **10.20535/2617-9741.3.2022.265359**. (Ukr.)
- [6] I.O. Mikulionok, "Plate-Type Gas Distribution Grids for Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents)," *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, № 1-2, pp. 168-175, 2021. doi: **10.1007/s10556-021-00911-2**.
- [7] A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov, and O. Shumylo, "Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel," in *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, Sept. 23-25, 2019, pp. 390-393. doi: **10.1109/MEES.2019.8896595**.
- [8] V. Zaharchuk et al., "The Choice of a Rational Type of Fuel for Technological Vehicles," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1759, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1759**.
- [9] V. Vychuzhanin et al., "Cognitive Model of the Internal Combustion Engine," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1738, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1738**.
- [10] I. Gritsuk et al., "The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1773, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1773**.
- [11] V.P. Mateichyk, V.P. Volkov, P.B. Komov, I.V. Gritsuk, A.P. Komov, and Yu.V. Volkov, "Osoblyvosti monitorynhu stanu transportnykh zasobiv z vykorystanniam bortovykh diahnostychnykh kompleksiv" ["Features of monitoring of vehicles state with using of board diagnostic complexes"], *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka – Project Management, Systems Analysis and Logistics*, vol. 13, pp. 126-138, 2014. (Ukr.)
- [12] M. Podrigalo et al., "Increase of Stability for Motor Cars in Service Braking," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1880, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1880**.
- [13] V. Mateichyk, M. Sága, M. Smieszek, and M. Tsiuman, "Information and analytical system to monitor operating processes and environmental performance of vehicle propulsion systems," in *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 776(1), article 012064, 2020. doi: **10.1088/1757-899X/776/1/012064**.
- [14] M. Mikhalevich et al., "Assessment of Operation Speed and Precision of Electropneumatic Actuator of Mechanical Transmission Clutch Control System," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1295, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1295**.
- [15] I. Kuric, V. Mateichyk, M. Smieszek, M. Tsiuman, N. Goridko, and I. Gritsuk, "The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact," in *MATEC Web of Conferences. Innovative Technologies in Engineering Production*, vol. 244, article 03003, 2018. doi: **10.1051/mateconf/201824403003**.
- [16] V.P. Volkov, V.P. Mateichyk, P.B. Komov, O.B. Komov, and I.V. Gritsuk, "Orhanizatsiia tekhnichnoi ekspluatatsii avtomobiliv v umovakh formuvannia intelektualnykh transportnykh system" ["Organization of technical operation of vehicles in the context of the formation of intelligent transport systems"], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Avtomobile- ta traktorobuduvannia – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Automobile and Tractor Construction*, № 29(1002), pp. 138-144, 2013. (Ukr.)
- [17] A.I. Golovan, "Perspektyvni napriamky ta innovatsiini pidkhody upravlinnia systemoiu tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Prospective directions and innovative approaches to managing the cargo vessel maintenance system"], *Rozvytok transportu – Transport development*, vol. 2(17), pp. 42-55, 2023. doi: **10.33082/td.2023.2-17.04**. (Ukr.)
- [18] A.I. Golovan, "Formuvannia optymalnykh parametriv systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden za rakhunok tsyfrovyykh stratehii" ["Formation of optimal parameters of the cargo ship maintenance system through digital strategies"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 47, pp. 297-305, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.47.2023.300116**. (Ukr.)
- [19] A.I. Golovan, "Metody kilkisnoi otsinky efektyvnosti system tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Methods for quantifying the efficiency of cargo ship maintenance systems"], *Rozvytok transportu – Transport development*, vol. 3(18), pp. 113-122, 2023. doi: **10.33082/td.2023.3-18.09**.
- [20] A.I. Golovan, "Kontseptualna model planuvannia ta optymizatsii hrafikiv tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Conceptual model of planning and optimization of cargo vessel maintenance schedules"], *Vodnyi transport – Water transport*, vol. 1(37), pp. 107-115, 2023. doi: **10.33298/2226-8553.2023.1.37.12**.

- [21] A.I. Golovan, "Doslidzhennia vplyvu kompleksnoi preskryptyvnoi systemy ta tsyfrovyykh stratehii na efektyvnist systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Impact of a complex prescriptive system and digital strategies on the efficiency of the cargo ship maintenance system"], *Vodnyi transport – Water transport*, vol. 1(39), pp. 112-123, 2024. doi: **10.33298/2226-8553.2024.1.39.11**.
- [22] A. Golovan, "Formuvannia tsyfrovyykh stratehii dlia vyryshennia zadach pidvyshchennia efektyvnosti system tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Formation of digital strategies for solving problems of increasing the efficiency of cargo ship maintenance systems"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 46, pp. 149-158, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.46.2023.288184**.
- [23] A.I. Golovan, "Osoblyvosti otsiniuvannia efektyvnosti system tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Features of evaluating the efficiency of cargo vessel maintenance systems"], *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Control, Navigation and Communication Systems*, vol. 1(75), pp. 5-10, 2024. doi: **10.26906/SUNZ.2024.1.005**.
- [24] J. Leng, D. Wang, W. Shen, X. Li, Q. Liu, and X. Chen, "Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 60, pp. 119-137, 2021. doi: **10.1016/j.jmsy.2021.05.011**.
- [25] M. Ammar, A. Haleem, M. Javaid, R. Walia, and S. Bahl, "Improving material quality management and manufacturing organizations system through Industry 4.0 technologies," *Materials Today Proceedings*, vol. 45, pp. 5089-5096, 2021. doi: **10.1016/j.matpr.2021.01.585**.
- [26] G. Caiza, and R. Sanz, "An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes," *Applied Sciences*, vol. 14, article 4125, 2024. doi: **10.3390/app14104125**.
- [27] J. Wan, B. Chen, and S. Wang, *Smart Manufacturing Factory: Artificial-Intelligence-Driven Customized Manufacturing*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2023. doi: **10.1201/9781003460992**.
- [28] M.W. Grieves, Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises, *International Journal of Product Development*, vol. 2, pp. 71-84, 2005. doi: **10.1504/IJPD.2005.006669**.
- [29] M.W. Grieves, *Product Lifecycle Management*. Nova Iorque, Brazil: McGraw-Hill, 2006.
- [30] M.W. Grieves, *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management*. Cocoa Beach, FL, USA : Space Coast Press, 2011.
- [31] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020. doi: **10.1109/ACCESS.2020.2998358**.
- [32] Y. Lu, C. Liu, K. I.-K. Wang, H. Huang, and X. Xu, "Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 61, article 101837, 2020. doi: **10.1016/j.rcim.2019.101837**.
- [33] L. Zhang, Y. Yan, Y. Hu, and W. Ren, "Reinforcement learning and digital twin-based real-time scheduling method in intelligent manufacturing systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, iss. 10, pp. 359-364, 2022. doi: **10.1016/j.ifacol.2022.09.413**.
- [34] L. Tian, G. Liu, and S. Liu, "Digital twin and production line simulation technology," *J. Graph*, vol. 3, pp. 349-358, 2021.
- [35] R. Xiao, S. Wang, Z. Liang, X. Zhang, and Y. Xie, "Digital-Twin-Assisted Optimization of Intelligent Manufacturing Flexible Production Line with Automated Guided Vehicle," in *Proceedings of the 2023 42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, July 24-26, 2023, pp. 5174-5179. doi: **10.23919/CCC58697.2023.10240458**.
- [36] M. Toothman et al., "A digital twin framework for prognostics and health management," *Computers in Industry*, vol. 150, article 103948, 2023. doi: **10.1016/j.compind.2023.103948**.
- [37] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, "Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, pp. 3563-3576, 2018. doi: **10.1007/s00170-017-0233-1**.
- [38] A.S. Mahomed, and A.K. Saha, Unleashing the Potential of 5G for Smart Cities: A Focus on Real-Time Digital Twin Integration, *Smart Cities*, vol. 8, article 70, 2025. doi: **10.3390/smartcities8020070**.
- [39] F. Tao et al., Digital twin and its potential application exploration, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol. 24, pp. 1-18, 2018. doi: **10.13196/j.cims.2018.01.001**.
- [40] V.P. Volkov, *Yntehratsyia tekhnicheskoi ekspluatatsyy avtomobylei v strukturi y protsessi yntelektualnikh transportnikh system: monohrafiya* [Integration of technical operation of vehicles into the structures and processes of intelligent transport systems: a monograph], Donetsk, Ukraine: Knowledge Publ., 2013. (Rus.)
- [41] STI FULHAM. [Online]. Available: <https://www.balticshipping.com/vessel/imo/9688374>. Accessed on: June 15, 2025.
- [42] MAN B&W S50ME-B9.3-TII. IMO Tier II. Project Guide. 2014.
- [43] STI FULHAM. IMO number: 9688374. STI FULHAM - DNV GL Vessel Register. 13.11.2021.
- [44] J. Janaun, N.H. Kamin, K.H. Wong, H.J. Tham, V.V. Kong, and M. Farajpourlar, "Design and simulation of heat exchangers using Aspen HYSYS, and

Aspen exchanger design and rating for paddy drying application,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Chemical and Bioprocess Engineering*, Kota Kinabalu, Malaysia, Dec. 9-12, 2015. doi: 10.1088/1755-1315/36/1/012056.

- [45] S. Garcia, and A. Trueba, “Fouling in heat exchangers,” in *Inverse Heat Conduction and Heat Exchangers*. London, UK: Intechopen Edition, 2019. doi: 10.5772/intechopen.88079.

[46] T.K.H. Teng, S.N. Kazi, A.B. Mahat, B.T. Chew, A. Al-Shamma’a, and A. Shaw, “Industrial heat exchanger: Operation and maintenance to minimize fouling and corrosion,” in *Heat Exchangers – advanced Features and Applications*. London, UK: Intechopen Edition, 2017. doi: 10.5772/66274.

Стаття надійшла 12.08.2025

Стаття прийнята 30.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Особливості оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників / І. В. Грицук та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 275-290. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344965>.

272 АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.396.: 351.814

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344967

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕНЬ ЛІТАКІВ ПІД ЧАС ПОЛЬОТУ НА МАРШРУТІ**Іващук О.Р.***аспірант, Державний університет «Київський Авіаційний Інститут», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5637-0332>, e-mail: 5162754@stud.kai.edu.ua;***Остроумов І.В.***д-р техн. наук, професор, Державний університет «Київський Авіаційний Інститут», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2510-9312>, e-mail: vany@kai.edu.ua*

В умовах великої завантаженості повітряного простору безпека сучасних авіап перевезень вимагає безперервного контролю у режимі, наближеному до реального часу. Важливою складовою безпеки повітряного руху є ризик зіткнення, що залежить від завантаженості повітряного простору, системи керування повітряним рухом та надійності обладнання. У статті виконано оцінювання ризику зіткнень літаків на етапі польоту за маршрутом у межах визначеного регіону повітряного простору. Запропонована методика ґрунтується на фрагментації повітряного простору на елементарні зони з використанням ієрархічної системи просторового індексування для визначення потенційних конфліктних точок та використанні моделей оцінки ризику, які підходять до пари літаків на основі напрямку польоту літаків. Відкриті дані про положення цивільних літаків, отримані за концепцією автоматичного залежного спостереження у широкомовному режимі, використано для оцінювання ризику зіткнення для конкретного повітряного простору. Оцінка ризику запропонована на основі комбінованої моделі повітряного руху за пересіченими та паралельними курсами. Априорні дані по відхиленнях літаків від заданих траєкторій руху отримані на основі статистичного аналізу траєкторій з минулих реалізацій маршрутів. Дані, які були зібрані в ході дослідження, наведені в таблицях. Розрахунки і збір даних виконуються з використанням програми, розробленої мовою програмування Python із залученням відповідних бібліотек, що забезпечують підключення до мережі передавачів автоматичного залежного спостереження, розрахунки ризиків за відповідною моделлю і візуалізацію даних. Запропонований підхід було верифіковано за допомогою відкритих даних про повітряний рух у межах повітряного простору Німеччини для певного часового відріку. Результати дослідження включають в себе як статистичну оцінку відхилення літаків, так і рекомендації щодо використання методики в зонах FRA і рекомендації щодо застосування результатів оцінки.

Ключові слова: аеронавігація, безпека цивільної авіації, керування повітряним рухом.

Постановка проблеми

Цивільна авіація розвивається стрімкими темпами про що свідчить статистика кількості пасажирів: 106 млн у 1960 році та 4,4 млрд у 2019 році [1]. Звісно виклики сучасності також мають суттєвий вплив на ці показники, під час Covid-19 у 2020 році пасажиропотік скоротився до 1,78 млрд, а прибутки від пасажирських перевезень зменшилися з 800 млрд до 350 млрд доларів США [2]. Не встигла авіаційна галузь відійти від наслідків пандемії, як настав новий виклик у вигляді геополітичної нестабільності в світі, яка призвела до обмеження доступу до значних ділянок повітряного простору, що спричинило масштабну перебудову маршрутів, в першу чергу це вплинуло на країни європейського союзу. Зміщення потоків повітряного руху призвело до збільшення навантаження на повітряний простір і змусило органи керування повітряним рухом адаптуватися до обмежень пропускної здатності, що, своєю чергою, спричинило зростання середніх затримок на маршруті до 2,13 хвилини на рейс у Європі у 2024 році [3]. Очікується, що тенденція зростання збережеться, що потребуватиме впровадження новітніх технологій навігації та спостереження, а також оновлення концепцій структури повітряного простору.

Сучасні системи управління безпекою дозволили забезпечити стабільне зростання світового авіаційного трафіку – з 32,2 млн до 37,7 млн рейсів, при цьому у 2023 році було зафіксовано лише одну катастрофу з летальними наслідками (72 загиблих) та 30 інцидентів без жертв [2]. Проте збільшення кількості користувачів повітряного простору створює додаткове навантаження на інфраструктуру безпеки, що може призвести до зниження її надійності та зростання ризиків у наданні авіаційних послуг [4].

За останні п'ять років кількість збройних конфліктів у світі подвоїлася [5]. Військові дії та політична нестабільність окремих країн часто призводять до обмеження доступного повітряного простору для транзитних польотів. У відповідь на сегрегацію повітряного простору авіакомпанії змушені планувати обхідні маршрути або використовувати верхні ешелони, що знижує ефективність перевезень і збільшує витрати. Яскравим прикладом є війна в Україні, яка призвела до повного закриття повітряного простору з лютого 2022 року та значного обмеження кількості польотів у низці країн [6]. Закриття повітряного простору змусило перенаправити повітряний трафік в обліт, щоб уникнути небезпечних зон, що, своєю чергою,

збільшило довжину маршрутів та тривалість польотів між більшістю європейських та азійських аеропортів [7, 8].

Обмеження використання окремих польотних зон призводить до перенавантаження сусідніх районів, що ускладнюється постійним зростанням обсягів повітряного руху при незмінному обсязі повітряного простору, що підвищує ризик зіткнень літаків у повітрі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасних стратегічних планах розвитку авіації передбачено низку рішень для підвищення пропускної здатності повітряного простору. Одним із ключових нововведень є впровадження концепції FRA (Free Route Airspace), яка дозволяє оптимізувати планування маршрутів і зменшити навантаження на диспетчерські служби. Однак у випадках сегрегації повітряного простору ідентифікація конфліктних точок і побудова обхідних траєкторій значно ускладнюють застосування FRA.

Експлуатація літаків у перевантажених районах пов'язана з підвищеним ризиком зіткнень. Оцінювання ризиків зіткнень літаків у цивільній авіації виконується за допомогою певних моделей, що зазвичай орієнтовані на певний сценарій розвитку подій. Наприклад, для випадку руху літаків на паралельних маршрутах найкраще зарекомендувала себе модель Рейха [9], а для більшості конфліктних ситуацій на етапі польоту за маршрутом – модель Андерсона, що ґрунтується на використанні різниці курсу між двома літаками [10]. Також відомі модифіковані моделі для певних сценаріїв: Андерсона-Хсу, Гаса та Маркова. Важливу роль у зниженні ризиків відіграє точність роботи бортових систем навігації [11].

Оцінювання ризику зіткнення літаків може виконуватись з використанням моделі літаків у вигляді сфери певного діаметру [12-16]. Подібні моделі чудово підходять для аналізу конфліктних ситуацій у зонах аеропортів, коли літаки змінюють свою висоту і маневрують.

Також відомі моделі оцінювання ризику зіткнень на основі геометрії зближення літаків у просторі [17]. Ці моделі є важкими для обчислень у зв'язку зі складними математичними моделями руху, що використовуються у них.

Результати сучасних досліджень вказують на кількісну перевагу системи ієрархічної просторової адресації для аналізу геопросторових даних. Представлення повітряного простору у вигляді множини правильних шестикутників дозволяє значно пришвидшити обчислення та проводити аналіз даних за допомогою простих логічних операцій.

Мета статті

Основною метою статті є розробка методики оцінки ризику зіткнень літаків на етапі польоту за маршрутом у межах визначеного регіону повітряного

простору. Запропонована методика ґрунтується на фрагментації повітряного простору на елементарні зони з використанням ієрархічної системи просторового індексування для визначення потенційних конфліктних точок та використанні моделей оцінки ризику, які підходять до пари літаків на основі напрямку польоту літаків. Новизна цього дослідження полягає у використанні просторової системи індексації та застосуванні комбінованого підходу до оцінки ризику зіткнень у повітряному просторі.

Застосування запропонованої методики дозволить виявити можливі зони високого ризику та визначити фактори, що призводять до підвищеного ризику, що дозволить визначити рівень безпеки цивільної авіації в умовах перевантаженого використання повітряного простору. Методика може бути використана для будь-якого повітряного простору. Проте, оскільки в даному дослідженні використовуються дані саме з повітряного простору Німеччини, ризики, гексагони, у яких були виявлені конфліктні пари, та інші результати, безпосередньо пов'язані з використанням зібраних даних, будуть у першу чергу актуальними для органів управління повітряним простором Німеччини.

Матеріали та методи

Об'єкт дослідження – процеси функціонування та розвитку систем авіаційних перевезень в умовах обмеженого доступу до повітряного простору, зростання інтенсивності повітряного руху та впровадження новітніх технологій управління. Предмет дослідження – моделі оцінки ризиків та ефективності авіаційних маршрутів у контексті сегрегації повітряного простору, зміни траєкторій польотів, впливу геополітичних чинників і застосування концепції FRA.

Комбінована модель оцінки ризику зіткнень у повітрі використовується для FRA для підтримки управління повітряним рухом. Розроблений алгоритм оцінки ризику інтегровано в автоматичне програмне забезпечення для управління повітряним рухом на основі глобальної системи просторового індексування. Шестикутна комірка використовується для аналізу ризику зіткнення в повітрі для користувачів, розташованих всередині елементарної комірки повітряного простору. Бібліотека НЗ Python також використовується для представлення повітряного простору та візуалізації ризику зіткнення в повітрі.

Виклад основного матеріалу

Літак, що виконує політ за певним маршрутом, може переходити з одного повітряного простору в інший. Це пов'язано з тим, що повітряний простір визначається над сухопутною територією і територіальними водами певної держави, що належать певній країні. Кожна країна сама визначає структуру свого повітряного простору відповідно до своїх географічних умов та особливостей. Літаки цивільної комерційної авіації використовують тільки контрольований повітряний

простір для польоту для забезпечення безпеки авіаперевезень. Для керування повітряним рухом застосовуються системи спостереження, що сьогодні ґрунтуються на радіолокаційних та мультилатераційних сенсорах та даних Автоматичного залежного спостереження у широкомовному режимі (ADS-B). Дані координат місцеположення літаків містять похибки, що визначають мінімуми ешелонування. На сьогоднішній день в більшості країн використовуються певні специфікації зональної навігації (RNAV) [18]. Ці специфікації визначають довірчу зону для положення літака в межах 95%. У загальному випадку норми вертикального ешелонування становлять 300 м до FL 290 та 600 м вище. Горизонтальне ешелонування між користувачами повітряного простору становлять 5,6 км для термінальної диспетчерської зони і 9,2 км для контрольованого району.

Повітряний простір вертикально розділений на ешелони польоту, висота між двома ешелонами польоту становить 100 футів. У межах ешелону польоту літак повинен рухатися лише в одному заданому напрямку. Але на маршруті рух може здійснюватися в обох напрямках; це забезпечується поділом напрямку за рівнем. Літаки використовують мережу заздалегідь розроблених маршрутів польоту, яка зазначена в аеронавігаційній базі даних певної країни [19].

Сьогодні ADS-B є ключовим джерелом даних з борту літака, що включає координати місцеположення у просторі. На відміну від інших систем спостереження, координати місцеположення літаків вимірюються на борту за допомогою системи супутникової навігації, що передаються через відкритий канал цифрового зв'язку на 1090 МГц. У номінальних умовах координати ADS-B є точнішими за інші сенсори спостереження, використовувани при організації повітряного руху. Сьогодні чимало комерційних наземних мереж програмно-керованих приймачів забезпечують приймання та обробку даних, прийнятих через ADS-B.

Для оцінки рівня ризику зіткнення літаків у повітряному просторі використаємо дані спостереження, отримані за концепцією ADS-B.

Оцінку ризику зіткнення літаків пропонується виконувати за комбінованою моделлю. Отже, для кожної пари літаків за попередніми даними виконується розрахунок траєкторних даних, що включає істинний курс літаків. Отримані курси по кожній парі літаків подаються на тригер паралельності, що класифікує модель, що застосовуватиметься у подальшому для оцінки ризику. У випадку, якщо траєкторії літаків перетинаються, то застосовується наступна модель:

$$R = 2n \left(\frac{2V_r}{\pi\lambda_{xy}} + \frac{V_z}{2\lambda_z} \right) P_z(h_z) P_{ho}, \quad (1)$$

де n – кількість пар літаків; V_r – відносна швидкість між літаками; λ_{xy} – середній горизонтальний розмір літака; λ_z – вертикальний безпечний розмір літака; P_{ho} – ймовірність горизонтального перекриття для нескінченно довгих траєкторій; V_z – відносна вертикальна

швидкість; $P_z(h_z)$ – ймовірність вертикального перекриття.

Ймовірність горизонтального перекриття оцінюється наступним чином:

$$P_{ho} = \pi\lambda_{xy}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_2^A(\xi) f_2^C(\eta) P_{h1}(\xi, \eta | V_1, V_2) d\xi d\eta, \quad (2)$$

де V_1, V_2 – шляхові швидкості обох літаків, що використовуються для оцінки ризику; f_1^A та f_2^A – похибки положення вздовж траєкторії; f_1^C та f_2^C – похибки поперечної траєкторії двох літаків; θ – кут між траєкторіями літаків; t – час; ξ та η – просторові інтеграли; d_{10} та d_{20} – початкові відстані двох площин від точки перетину.

Ймовірність вертикального відхилення літака [20]:

$$P_z = \int_{-\lambda_z}^{\lambda_z} \int_{-\infty}^{+\infty} L(z_1) L(h_z + z_1 - z) dz_1 dz, \quad (3)$$

де $L(x)$ – функція щільності ймовірності Лапласа; λ_z – вертикальний розмір літака; h_z – вертикальна відстань.

Параметр масштабу цього розподілу становить 38 футів для висот нижче 290 FL (410 FL, якщо літак знаходиться в повітряному просторі, де застосовуються зменшені мінімуми вертикального ешелонування) та 76 футів вище.

Ризик зіткнення для літаків, що були ідентифіковані як такі, що рухаються на паралельних маршрутах, оцінюємо за допомогою моделі [9]:

$$R_r = 2P_y P_z P_{xy} \left(\frac{V_x}{2\lambda_x} + \frac{V_y}{2\lambda_y} + \frac{V_z}{2\lambda_z} \right), \quad (4)$$

де P_y – ймовірність бічного перекриття для літаків, що номінально знаходяться на одному шляху; P_z – ймовірність вертикального перекриття; P_{xy} – ймовірність поздовжнього перекриття для літаків, що номінально знаходяться на одному шляху; V_y – середня відносна бічна швидкість; V_z – середня відносна вертикальна швидкість; V_x – поздовжня швидкість підходу до літака; λ_x – середня довжина літака; λ_z – безпечний вертикальний розмір літака; λ_y – розмах крил літака.

Ймовірність поздовжнього перекриття можна оцінити наступним чином:

$$P_{xy} = \frac{2\lambda_x}{2TV_x \left(1 + \frac{1}{b}\right)^2 e^{\frac{s_{min}}{b}}}, \quad (5)$$

де T – середній період; s_{min} – дистанція між літаками; b – параметр масштабу.

Ймовірність відхилення літака від запланованого маршруту є важливим показником для оцінки безпеки польотів. Це відхилення спричинене невизначеністю, пов'язаною з помилками, які можна розділити на дві основні складові:

- помилки бортової системи позиціонування: це помилки, що виникають через недосконалість обладнання, наприклад, системи позиціонування;
- помилки пілотування: це відхилення, що є результатом дії помилок пілота або автопілота.

Для оцінки цих відхилень та їх впливу на безпеку польотів використовується статистичний аналіз. Однак цей підхід має значні обмеження. Статистична оцінка ймовірності може бути неточною, особливо коли кількість вимірювань обмежена. У таких випадках для

оцінки ймовірностей відхилення використовується окремим функція щільності ймовірності (PDF), яка дозволяє оцінити ймовірність перебування літака в межах певної довірчої зони, навіть за наявності невеликої кількості даних

У якості PDF використовується одновимірний узагальнений розподіл помилок через його гнучкість у зміні форми від подвійної експоненціальної ($s = 1$) до нормальної функції ($s = 0,5$) [21, 22]:

$$PDF(x) = \frac{1}{\Gamma(s+1)\sigma 2^{s+1}} \exp\left(-0.5 \left|\frac{x-\mu}{\sigma}\right|^{\frac{1}{s}}\right), \quad (6)$$

де s – параметр для контролю асиметрії; σ – середнє стандартне відхилення; $\Gamma(x)$ – гамма-функція Ейлера; μ – середнє значення.

Для горизонтальної площини ризик відхилення повітряного судна від максимально допустимих рівнів оцінюється за формулою (6) наступним чином:

$$P_h = \int_{-\infty}^b PDF(x) dx + \int_{-\infty}^{-b} PDF(x) dx, \quad (7)$$

де b – мінімальна ешелонування, дозволена в певному повітряному просторі.

Для зручності представимо формулу (7) як:

$$P_h = 1 - \int_{-b}^b PDF(x) dx. \quad (8)$$

Для зменшення кількості обчислень при виявленні потенційно-можливих пар літаків для оцінки ризиків зіткнень пропонується застосувати поділ повітряного простору на елементарні зони певного розміру відповідно до рівня точності навігаційного обладнання.

Для цього використано систему геопросторової адресації НЗ (СГА), що базується на рівномірному поділі площі на поверхні еліпсоїда на елементарні частинки шестикутної форми. Данні траєкторії користувачів повітряного простору перетворюються на індекси СГА, а комбіновану модель ризику зіткнень літаків у повітрі застосовуємо до індексів СГА. СГА значно збільшує швидкість обробки даних порівняно з географічними даними. СГА спрощує розрахунки для практичного впровадження та підтримує швидкий перерахунок динамічно змінних даних про повітряний рух [23, 24].

Для кожної шестикутної комірки визначається кількість літаків, що знаходяться в ній одночасно. Для кожної ідентифікованої пари літаків, що знаходяться в одній комірі, оцінюється ризик зіткнення. Результати оцінки ризику візуалізуються на картах OpenStreet за допомогою бібліотеки НЗ та зберігаються у файлах даних.

Цивільна авіація використовує цільовий рівень безпеки (TLS) для визначення мінімально необхідного рівня ризику для забезпечення безпеки польотів [25, 26]. TLS використовується як максимально прийнятний ризик, забезпечення якого гарантує безпеку повітряного руху. Відповідно до міжнародних нормативних документів у загальному випадку вважають, що $TLS = 2.5 \times 10^{-7}$ [26].

Результати та їх обговорення

Для практичної верифікації запропонованого підходу розроблено програмне забезпечення у середовищі Python. У якості даних спостереження використаємо дані ADS-B. Використана мережа OpenSky для отримання даних ADS-B у режимі реального часу [27]. Загалом існує кілька комерційно доступних мереж передачі даних, які забезпечують надійний доступ до наборів даних ADS-B. Найбільш популярними з них є Flightradar24, OpenSky та Flightaware [28]. Слід зазначити що зона дії наземної станції ADS-B обмежена максимальною дальністю радіозв'язку. Покриття OpenSky за даними мережі на серпень 2025 р. наведено на рис. 1 [27].



Рис. 1 – Покриття мережі наземних ADS-B станцій у Європі на серпень 2025 р.

У зв'язку з закритим повітряним простором України проведемо дослідження рівня ризику зіткнення літаків у повітряному просторі Німеччини.

Повітряний простір Німеччини включає три польотні регіони: EDWW, EDGG та EDMM. Розроблене програмне забезпечення збирає дані про користувачів повітряного простору у режимі реального часу, розташованих всередині заданої межі. У дослідженні використано два набори даних: з 7 по 18 січня 2025 року та з 18 по 24 червня 2025 року. Для збору даних програмне забезпечення використовує OpenSky Network API [21]. Дані збираються для меж прямокутної області, що визначається двома верхніми точками $47^{\circ}27'47.20''N$ $05^{\circ}86'50.0''E$ та $55^{\circ}05'65.30''N$ $15^{\circ}03'38.2''E$. Також використовуються цілі траєкторії літаків, ідентифікованих у прямокутній області на основі ідентифікованого унікального коду ICAO літака (функція `get_track_by_aircraft()` у API) для отримання статистичних даних траєкторій літаків.

Записаний набір даних містить 447 унікальних літаків 40 різних типів. Загальна тривалість усіх польотів становила понад 196 годин. Також вихідними даними для розрахунку ризиків є технічні характеристики літаків, що були зафіксовані у повітряному просторі. Моделі параметрів літаків для розрахунку було взято з

бази даних характеристик літаків BADA (EUROCONTROL). Приклад вхідних даних повітряного руху та геометричних характеристик літаків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Приклад вхідних даних про повітряний рух

ICAO 24-bit address	Тип літального апарату	Максимальні горизонтальні розміри, [м]	Вертикальні розміри, [м]	Загальний зареєстрований час польоту
3c65cb	A20N	37.5	11.7	05:34:57
4baa63	A321	44.5	11.8	01:52:19
3c5ee2	A319	33.8	11.7	06:25:29
4066d0	B738	39.5	12.6	09:26:45
4bc886	A21N	44.5	11.7	04:18:13
4bb279	A21N	44.5	11.7	07:47:36
3c5b31	A333	63.6	16.7	05:52:0
3c48f0	A319	33.8	11.7	07:35:34
461f39	A319	33.8	11.7	02:55:38
4bb20d	A21N	44.5	11.7	05:16:37
3c4b29	B748	76.4	19.5	05:26:8
4cabde	CRJX	39.1	7.1	04:8:43
44ce75	A319	33.8	11.7	16:58:33
4079a9	B738	39.5	12.6	06:22:40
3d338e	RV12	8.15	2.54	01:22:20

Програмне забезпечення асоціює кожний літак з певною адресою гексагональної комірки системи НЗ. Точність поділу простору визначається розміром сторони правильного шестикутника. У дослідженні обрано шестикутники з довжиною сторони 3,7 км, що відповідає вимогам до горизонтального ешелонування, де мінімальна безпечна відстань між повітряними суднами має знаходитись у межах 5,6 км. Сторона правильного шестикутника дорівнює радіусу описаного кола, а діаметр комірки (подвоєний радіус) становить 7,4 км, що на 25% перевищує нормативну межу горизонтального розділення. Це дозволяє враховувати потенційні зони ризику з деяким запасом.

Після перетворення координат в індекси шестикутників виконуємо пошук літаків з однаковим адресом шестикутника. У результаті фільтрації повторень визначаються шестикутники, де одночасно перебуває більше одного літака. Частота таких випадків показано на OpenStreetMap (рис. 2).

На рис. 2 кольором позначено інтенсивність повітряного руху: зеленим показано зони без повітряного руху, сірим шестикутники у яких спостерігався хоча б один літак, червоним - ділянки, де одночасно перебували два або більше літаків.

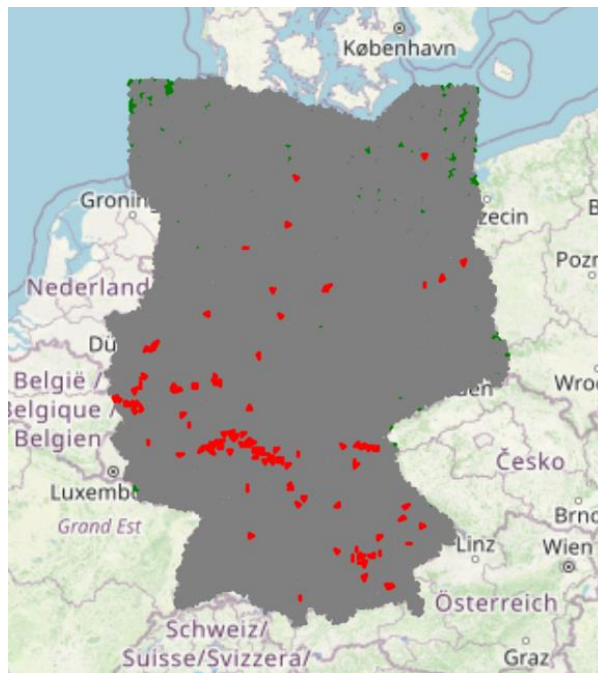


Рис. 2 – Кількість літаків у комірці

Наявність кількох літаків у межах одного шестикутника може свідчити про порушення вимог горизонтального ешелонування, особливо якщо вони перебували на однаковому рівні польоту.

Пари літаків, що перебували в однакових гексагональних осередках, були використані для оцінювання ризиків зіткнення згідно з моделями (1) та (4). Зокрема, модель (4) потребує оцінки ймовірності горизонтального перетину маршрутів, що інтерпретується як шанс виходу літака за межі запланованої траєкторії. Хоча номінально літаки на маршруті витримують центральну вісь, дія навігаційних похибок спричинює певні відхилення.

Для отримання апіорної інформації щодо відхилень літаків для кожного літака було проаналізовано історичні реалізації польотів для визначення горизонтальних відхилень від середньої лінії маршруту. В статистичному аналізі використано лише дані під час польоту по маршруту без етапів набору та зниження висоти.

У повітряному просторі Німеччини, де застосовується концепція FRA, транзитні польоти здійснюються прямими маршрутами між точками входу та виходу. При аналізі програмне забезпечення агрегувало траєкторії літаків за однаковими маршрутними сегментами та розрахувало середню траєкторію, яка слугує базою для оцінки відхилень.

На рис. 3 наведено результати аналізу відхилень літаків від запланованої траєкторії руху у вигляді гістограми відхилень. Також рис. 3 містить результати підгонки функції щільності ймовірності (PDF), що базується на одномірному узагальненому розподілі похибок (6).

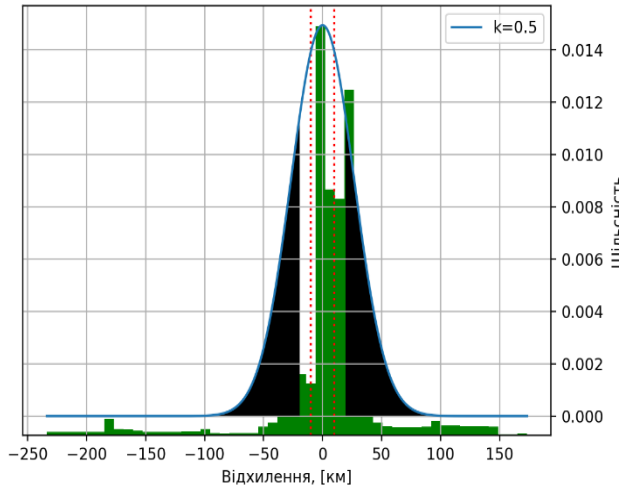


Рис. 3 – Результати статистичного аналізу відхилень користувачів повітряного простору від центру запланованої траєкторії руху

Допустима величина відхилень коливається у межах ± 10 км для етапу польоту за маршрутом, що відповідає ширині траси горизонтально. Для оцінки апіорної ймовірності відхилення літака від запланованого маршруту оцінено площу області нижче PDF від мінус

нескінченності до -10 км та від 10 км до плюс нескінченності. Результат оцінки дав апіорну ймовірність відхилень 68% для усього трафіку. Під час оцінки відхилень використано середню траєкторію як базову лінію для побудови PDF відхилень, що є методологічним спрощенням. Такий підхід не враховує асиметрію та системні зміщення, характерні для реального трафіку. Подальші дослідження планують включати побудову PDF на основі фактичних траєкторій, застосування адаптивних фільтрів та кластеризацію маршрутів для підвищення точності оцінки ризику.

Отже, для кожного шестикутника, у межах якого виявлено більше двох літаків, виконується оцінювання ризику зіткнення літаків для кожної пари окремо. При цьому спершу оцінюються кути істинних курсів та проводиться детектування моделі для оцінки. В табл. 2 наведено перші дев'ять ідентифікованих пар літаків на основі найвищого значення ризику. Також зазначені унікальні ідентифікатори літаків (ICAO код), адреса шестикутника та час.

Результати оцінки ризику зіткнення для пар літаків у табл. 2 наведено в табл. 3. Крім того, у табл. 3 зазначається модель, яка була використана для оцінки ризику, модель R вказує, що використовується рівняння (4), модель A – рівняння (1).

Таблиця 2

Ідентифіковані пари користувачів повітряного простору				
Пари	Літак 1	Літак 2	Адреса шестикутника	Час, UTC
1	4bb20d	4bb279	861fa1cb7ffffff	06.24 10:41:03
2	3d338e	44ce75	861fa3baffffff	06.19 21:23:35
3	4066d0	4bc886	861f8dcf7ffffff	06.24 10:58:51
4	4079a9	3c5b31	861fa840ffffff	06.20 19:25:16
5	4066d0	3c4b29	861fa116ffffff	06.24 10:33:57
6	3c48f0	461f39	861f10a17ffffff	01.09 21:12:02
7	4cabde	3c6594	861fa8da7ffffff	01.09 22:17:39
8	3c5ee2	3c6659	861fab37ffffff	01.10 22:14:23
9	4baa63	3c65cb	861e3675ffffff	01.08 21:54:27

Таблиця 3

Результати оцінки ризику зіткнення в повітрі для вибраних пар			
Пари	Ризик	Порівняння з TLS	Модель
1	5.291×10^{-22}	Нижче	R
2	9.858×10^{-22}	Нижче	R
3	4.497×10^{-19}	Нижче	R
4	1.455×10^{-07}	Вище	R
5	9.401×10^{-06}	Вище	R
6	2.38×10^{-10}	Нижче	A
7	2.46×10^{-10}	Нижче	A
8	3.81×10^{-10}	Нижче	A
9	6.77×10^{-10}	Нижче	A

Рішення щодо моделі було прийнято на основі наявності точки перетину попереду між двома траєкторіями. Близько 108 пар у доступному наборі даних було ідентифіковано на основі розташування обох літаків в унікальній шестикутній комірці.

Результати дослідження показують, що модель А була застосована у 32% конфліктних ситуацій. Також ідентифіковані пари літаків у шестикутній комірці мали достатній рівень вертикального ешелонування понад 300 метрів, що відповідає прийнятому мінімуму вертикального ешелонування.

Результати дослідження повітряного руху показують, що найвище значення ризику зіткнення в повітрі (9.401×10^{-6}) було виявлено для пари літаків 3c4b29 та 4066d0 на паралельних маршрутах у комірці шестикутника 861fa116ffffff (24 червня о 10:33:57 UTC). Найнижчий ризик зіткнення в повітрі для пари в межах шестикутної комірки 861faeae7ffffff становив 5.291×10^{-2} для пари 4bb20d-4bb279, що було виявлено 24 червня о 10:41:03 UTC.

Результати оцінки ризиків порівнюються зі значенням $TLS\ 2.5 \times 10^{-7}$ по моделям. Результати, отримані по моделі А, мають нижчі значення за встановлене значення TLS. Однак застосування моделі R ускладнене значними значеннями відхилення літака в горизонтальній площині (Py Pxу). Проте низькі значення Pz зробили загальний ризик зіткнення в повітрі значно нижчим, як наслідок тільки 22% мають значення вищі, ніж TLS. Загалом по двох моделях тільки 15% отриманих значень вище TLS, але враховуючи висоти польотів літаків ризик зіткнення зменшився значно та задовільнив вимоги TLS у всіх конфліктних випадках.

Висновки

Оцінка ризику зіткнення літаків є важливим елементом забезпечення безпеки повітряного руху. Результати оцінювання ризику зіткнень для повітряного простору Німеччини показали, що у 108 шестикутниках були ідентифіковані конфліктні ситуації без врахування висоти польоту. Ризик зіткнення для сценарію паралельних маршрутів показав значення, що на 22% перевищують значення TLS. Модель для сценаріїв руху літаків за маршрутами, що перетинаються, показала значення, що постійно нижчі за прийняте значення TLS. Результати статистичної оцінки відхилення літаків від центру визначного ешелону руху вказують на 32% значних відхилень за меж дозволеного інтервалу. Це вказує на значну варіантність маршрутів та потребу у більш тонкому моделюванні PDF.

За результатами дослідження можна рекомендувати використовувати результати СГА для задач оцінки безпеки повітряного руху та динамічної секторизації, а для регіонів із підвищеним ризиком застосовувати обмеження щільності повітряного руху. Також дієвим механізмом може бути запровадження адаптивних мінімумів горизонтального ешелонування залежно від точності даних позиціонування у ADS-B.

Для зон FRA можна визначити зони пріоритетного контролю (віртуальні коридори) навколо найбільш інтенсивних шестикутників і призначати в них підвищені вимоги до попередньої перевірки планів польоту, застосувати кластеризацію маршрутних сегментів за даними ADS-B для побудови більш пристосованих маршрутів, що дозволить знизити невизначеність маршрутів та звужить PDF для відхилень.

Додаток

СГА – система геопросторової адресації
FIR (район польотної інформації)
ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)-автоматичне залежне спостереження - мовлення
PDF (probability density function) – функція щільності ймовірності
TLS (target level of safety) – цільовий рівень безпеки
FL (flight level) – ешелон польоту
RNAV (Area Navigation) – зональна навігація

Перелік використаних джерел

- [1] International Air Transport Association. World Air Transport Statistics 2020. Montreal: IATA, 2020. 64 p.
- [2] IATA: Annual Review 2023. IATA (2023). URL: <https://www.iata.org/content-tasets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/annual-review-2023.pdf> (дата звернення: 25.05.2025).
- [3] EUROCONTROL: Performance Review Report (PRR) 2024. URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/performance-review-report-prr-2024> (дата звернення: 25.05.2025).
- [4] Волковська Г. Г., Ситник Д. О. Управління ризиками в авіаційній безпеці. URL: <https://er.nau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/29a654ae-946b-4719-b673-42ef2fbc9c95/content> (дата звернення: 25.05.2025).
- [5] ACLED Conflict Index, ACLED. URL: <https://acleddata.com/conflict-index> (дата звернення: 25.05.2025).
- [6] The Effect of Russia – Ukraine War on International Aviation Sectors / Prakasa S. U. W., Wijayanti A., Hariri A., Yustitiantingtyas L. *KnE Social Sciences*. 2022. Vol. 7, № 1. Pp. 572-581. DOI: <https://doi.org/10.18502/kss.v7i15.12132>.
- [7] Ennen D., Wozny F. Airspace closures following the war of aggression in Ukraine: Impact on Europe-Asia airfares. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 78. Pp. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.014>.
- [8] Ostroumov I. V., Ivashchuk O., Kuzmenko N. S. Preliminary Estimation of war Impact in Ukraine on the Global Air Transportation. *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Spišská Kapitula, Slovakia, 26-28 September 2022. Pp. 281-284. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT54803.2022.9913092>.

- [9] ICAO: The Vertical Reich Collision Risk Model. URL: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2003/APATM6/WP10-apatm6Item3-APXb.pdf> (дата звернення: 30.05.2025).
- [10] Aldis G., Barry S. Fast evaluation of the Anderson-Hsu collision risk for a crossing track scenario. *Proceedings of the ICAO SASP-WGH-27 Meeting*, Oklahoma City, USA, 17-19 November 2015.
- [11] Levy B. S., Som P., Greenhaw R. Analysis of flight technical error on straight, final approach segments. *Proceedings of the 59th Annual Meeting of The Institute of Navigation and CIGTF 22nd Guidance Test Symposium*, Albuquerque, USA, 23-25 June 2003. Pp. 456-467.
- [12] Data-driven mid-air collision risk modelling using extreme-value theory / Figuet B., Monstein R., Waltert M., Morio J. *Aerospace Science and Technology*. 2023. Vol. 142, part A. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108646>.
- [13] Su Y., Xu Y. A risk assessment method for mid-air collisions in urban air mobility operations. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2024. Vol. 10, iss. 2. Pp. 1327-1341. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3426915>.
- [14] Campos L. M. B. C., Marques J. M. G. On Probabilistic Risk of Aircraft Collision along Air Corridors. *Aerospace*. 2021. Vol. 8(2). Article 31. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace8020031>.
- [15] Mosa H., Saleh A., Al-Badarneh A. Performance comparison of spatial data indexing using distributed systems. *2025 International Conference on New Trends in Computing Sciences (ICTCS)*, Amman, Jordan, 16-18 April 2025. Pp. 327-333. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTCS65341.2025.10989398>.
- [16] Neelakandan D. S., Al Ali H. Enhancing Trajectory-Based Operations for UAVs through Hexagonal Grid Indexing: A Step towards 4D Integration of UTM and ATM. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. 2023. Vol. 10, no. 2. Pp. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.58940/2374-6793.1815>.
- [17] A Low-Altitude Flight Conflict Detection Algorithm Based on a Multilevel Grid Spatiotemporal Index / S. Miao et al. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019. Vol. 8, no. 6. Article 289. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi8060289>.
- [18] ICAO. Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management (PANS-ATM). Doc. 4444. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2016. 476 p.
- [19] ICAO. Performance-Based Navigation (PBN) Manual. Doc. 9613. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2008. 398 p.
- [20] ICAO. The Longitudinal Reich Collision Risk Model. SASP-WG/WHL/20-IP/10. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2012.
- [21] Giller G. L. A Generalized Error Distribution. *SSRN Electronic Journal*. 2005. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2265027>.
- [22] Back W. E., Boles W. W., Fry G. T. Defining Triangular Probability Distributions from Historical Cost Data. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2000. Vol. 126, no. 1. Pp. 29-37. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2000\)126:1\(29\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2000)126:1(29)).
- [23] Hierarchical hexagonal spatial index. H3. URL: <https://h3geo.org/docs/comparisons/s2> (дата звернення: 21.09.2025).
- [24] A precision evaluation index system for remote sensing data sampling based on hexagonal discrete grids / Y. Ma et al. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10(3). Article 194. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10030194>.
- [25] ICAO. Aircraft Operations. Volume II – Construction of Visual and Instrument Flight Procedures. 7th ed. Doc. 8168. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [26] ICAO. Manual on Implementation of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive. 2nd ed. Doc. 9574. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2002.
- [27] The OpenSky Network. URL: <https://opensky-network.org> (дата звернення: 30.05.2025).
- [28] FlightAware and ADS-B. URL: <https://www.flightaware.com/adsb> (дата звернення: 21.09.2025).

RISK CALCULATION METHODOLOGY IN GERMAN AIRSPACE

Ivashchuk O.R.

postgraduate student, State university «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5637-0332>, e-mail: 5162754@stud.kai.edu.ua;

Ostroumov I.V.

D.Sc. (Engineering), professor, State university «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2510-9312>, e-mail: vany@kai.edu.ua

In conditions of high airspace congestion, the safety of modern air transportation requires continuous control in a mode close to real time. An important component of air traffic safety is the risk of collision, which depends on the airspace congestion, the air traffic control system and the reliability of the equipment. The article assesses the risk of aircraft collisions during en-route flight within a specific airspace region. The proposed methodology is based on the

fragmentation of airspace into elementary zones using a hierarchical spatial indexing system to identify potential conflict points and uses risk assessment models that are suitable for a pair of aircraft based on the direction of flight of the aircraft. Open data on the position of civil aircraft obtained using the concept of automatic dependent observation in the broadcast mode are used to assess the risk of collision for a specific airspace. The risk assessment is proposed based on a combined model of air traffic on intersecting and parallel courses. A priori data on aircraft deviations from the specified trajectories of movement were obtained based on statistical analysis of trajectories from past route implementations. The data collected during the study are given in tables. Calculations and data collection are performed using a program developed in the Python programming language with the involvement of appropriate libraries that are responsible for connecting to the network of automatic dependent observation transmitters, calculating risks using the appropriate model and visualizing data. The proposed approach was verified using open data on air traffic within German airspace for a certain time frame. The results of the study include both a statistical assessment of aircraft deviations and recommendations for using the methodology in FRA areas and recommendations for applying the assessment results.

Keywords: air navigation, civil aviation safety, air traffic control.

References

- [1] International Air Transport Association. *World Air Transport Statistics 2020*. Montreal, Canada: IATA, 2020.
- [2] IATA: Annual Review 2023. 2023. [Online]. Available: <https://www.iata.org/content-tassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/annual-review-2023.pdf>. Accessed on: May 25, 2025.
- [3] EUROCONTROL: Performance Review Report (PRR) 2024. [Online]. Available: <https://www.euro-control.int/publication/performance-review-report-prr-2024>. Accessed on: May 25, 2025.
- [4] H.H. Volkovska, and D.O. Sytnyk, "Upravlinnia ryzykamy v aviatsiinii bezpetsi" ["Risk management in aviation security"]. [Online]. Available: <https://er.nau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/29a654ae-946b-4719-b673-42ef2fbc9c95/content>. Accessed on: May 25, 2025. (Ukr.)
- [5] ACLED Conflict Index, ACLED. [Online]. Available: <https://acleddata.com/conflict-index>. Accessed on: May 25, 2025.
- [6] S.U.W. Prakasa, A. Wijayanti, A. Hariri, and L. Yustitiningtyas, "The Effect of Russia – Ukraine War on International Aviation Sectors," *KnE Social Sciences*, vol. 7, № 1, pp. 572-581, 2022. doi: **10.18502/kss.v7i15.12132**.
- [7] D. Ennen, and F. Wozny, "Airspace closures following the war of aggression in Ukraine: Impact on Europe-Asia airfares," *Transportation Research Procedia*, vol. 78, pp. 103-110, 2024. doi: **10.1016/j.trpro.2024.02.014**.
- [8] I.V. Ostroumov, O. Ivashchuk, and N.S. Kuzmenko, "Preliminary Estimation of war Impact in Ukraine on the Global Air Transportation," in *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Spišská Kapitula, Slovakia, Sept. 26-28, 2022, pp. 281-284. doi: **10.1109/ACIT54803.2022.9913092**.
- [9] ICAO: The Vertical Reich Collision Risk Model. [Online]. Available: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2003/APATM6/WP10-apatm6Item3-APXb.pdf>. Accessed on: May 30, 2025.
- [10] G. Aldis, and S. Barry, "Fast evaluation of the Anderson-Hsu collision risk for a crossing track scenario," in *Proceedings of the ICAO SASP-WGH-27 Meeting*, Oklahoma City, USA, Nov. 17-19, 2015.
- [11] B.S. Levy, P. Som, and R. Greenhaw, "Analysis of flight technical error on straight, final approach segments," in *Proceedings of the 59th Annual Meeting of The Institute of Navigation and CIGTF 22nd Guidance Test Symposium*, Albuquerque, USA, June 23-25, 2003, pp. 456-467.
- [12] B. Figuet, R. Monstein, M. Waltert, and J. Morio, "Data-driven mid-air collision risk modelling using extreme-value theory," *Aerospace Science and Technology*, vol. 142, part A, 2023. doi: **10.1016/j.ast.2023.108646**.
- [13] Y. Su, and Y. Xu, "A risk assessment method for mid-air collisions in urban air mobility operations," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 10, iss. 2, pp. 1327-1341, 2024. doi: **10.1109/TIV.2024.3426915**.
- [14] L.M.B.C. Campos, and J.M.G. Marques, "On Probabilistic Risk of Aircraft Collision along Air Corridors," *Aerospace*, vol. 8(2), article 31, 2021. doi: **10.3390/aerospace8020031**.
- [15] H. Mosa, A. Saleh, and A. Al-Badarneh, "Performance comparison of spatial data indexing using distributed systems," in *2025 International Conference on New Trends in Computing Sciences (ICTCS)*, Amman, Jordan, April 16-18, 2025, pp. 327-333. doi: **10.1109/ICTCS65341.2025.10989398**.
- [16] D.S. Neelakandan, and H. Al Ali, "Enhancing Trajectory-Based Operations for UAVs through Hexagonal Grid Indexing: A Step towards 4D Integration of UTM and ATM," *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, vol. 10, no. 2, pp. 1-21, 2023. doi: **10.58940/2374-6793.1815**.
- [17] S. Miao et al., "A Low-Altitude Flight Conflict Detection Algorithm Based on a Multilevel Grid Spatiotemporal Index," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 6, article 289, 2019. doi: **10.3390/ijgi8060289**.
- [18] ICAO. *Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management (PANS-ATM)*. Doc.4444.

- Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [19] ICAO. *Performance-Based Navigation (PBN) Manual*. Doc. 9613. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2008.
- [20] ICAO. *The Longitudinal Reich Collision Risk Model*. SASP-WG/WHL/20-IP/10. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2012.
- [21] G.L. Giller, A Generalized Error Distribution, *SSRN Electronic Journal*, pp. 1-7, 2005. doi: **10.2139/ssrn.2265027**.
- [22] W.E. Back, W.W. Boles, and G.T. Fry, "Defining Triangular Probability Distributions from Historical Cost Data," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 126, no. 1, pp. 29-37, 2000. doi: **10.1061/(asce)0733-9364(2000)126:1(29)**.
- [23] Hierarchical hexagonal spatial index. H3. [Online]. Available: <https://h3geo.org/docs/comparisons/s2>. Accessed on: September 21, 2025.
- [24] Y. Ma et al., "A precision evaluation index system for remote sensing data sampling based on hexagonal discrete grids," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 10(3), article 194, 2021. doi: **10.3390/ijgi10030194**.
- [25] ICAO. *Aircraft Operations. Volume II – Construction of Visual and Instrument Flight Procedures*, 7th ed. Doc. 8168. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [26] ICAO. *Manual on Implementation of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive*, 2nd ed. Doc. 9574. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2002.
- [27] The OpenSky Network. [Online]. Available: <https://opensky-network.org>. Accessed on: May 30, 2025.
- [28] FlightAware and ADS-B. [Online]. Available: <https://www.flightaware.com/adsb>. Accessed on: September 21, 2025.
- Стаття надійшла 29.08.2025
Стаття прийнята 14.10.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Іващук О. Р., Остроумов І. В. Оцінювання ризику зіткнень літаків під час польоту на маршруті. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 291-300. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344967>.

273 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.4.018

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344983

**ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УНІВЕРСАЛЬНОГО
ВАНТАЖНОГО ВАГОНА МОБІЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ**

- Фомін О.В.** *д-р техн. наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>, e-mail: fomin1985@ukr.net;*
- Прокопенко П.М.** *PhD (Залізничний транспорт), начальник управління інжинірингу, філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1631-6590>, e-mail: prokopenko1520mm@gmail.com;*
- Климаш А.О.** *канд. техн. наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-1195>, e-mail: klimash@snu.edu.ua;*
- Кузьменко С.В.** *канд. техн. наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0871-9864>, e-mail: kuzmenko@snu.edu.ua*

Дане дослідження спрямоване на розвиток підходів та інструментів для експериментального аналізу показників міцності та якості руху нових вантажних вагонів з метою допуску їх до експлуатації на коліях загального користування. Це передбачає оновлення теоретичних принципів, методів тестування та обладнання, зокрема заміну вагонів-лабораторій на мобільні цифрові вимірювальні системи. Також в роботі запропоновано оцінку показників якості руху (коефіцієнт запасу стійкості, коефіцієнти вертикальної динаміки) за допомогою вимірювання напружень в диску колеса колісної пари вантажного вагона. У роботі використано методику вимірювання сил між колесом та рейкою шляхом фіксації деформацій у ключових зонах з метою подальшої оцінки показників якості руху вагона в умовах експлуатації. Паралельно обґрунтовано необхідність модернізації програмних та методичних рішень для оцінки динамічних характеристик нового та модернізованого рухомого складу, який зараз будується Українськими вагонобудівними заводами. Обґрунтовано доцільність заміни вагонів-лабораторій на компактні мобільні комплекси, що підвищить оперативність та достовірність випробувань. Встановлено зони впливу вертикальних та бічних навантажень на напруження в диску колеса вантажного вагона. Запропонована оптимізована схема розміщення тензодатчиків для точного визначення сил колеса-рейки. В роботі сформульовані універсальні технічні вимоги до мобільних вимірювальних систем, призначених для експлуатаційного контролю якості руху вантажних вагонів в умовах експлуатації та під час виконання робіт з допуску нових вагонів на колії загального користування. Запропонована система успішно випробувана в реальних умовах експлуатації вантажного вагона. Отримані результати дозволяють чітко визначити технічні параметри для створення мобільних діагностичних комплексів. Ці дані мають вагоме значення при проектуванні систем моніторингу для залізничного транспорту, орієнтованих на оцінку безпеки шляхом постійного контролю стану конструкцій та динаміки руху. Їх реалізація безпосередньо сприятиме зниженню ризику аварій на залізницях.

Ключові слова: випробування, вантажний вагон, міцність, безпека руху, мобільна система, залізничний транспорт.

Постановка проблеми

Концепція безпеки руху на залізничному транспорті базується на комплексі організаційних та технічних дій. Їхня основна мета – запобігання аваріям та підтримка належного стану всіх елементів інфраструктури, включаючи колію, рухомий склад, спеціалізоване обладнання та механізми. Експлуатація складних технічних систем, зокрема рухомого складу, нерідко супроводжується відмовами. До ключових причин таких відмов належать: порушення технології виробництва окремих вузлів або систем; вплив екстремальних робочих умов; некоректне використання систем з

порушенням регламентованих вимог; природні процеси старіння та зношування компонентів.

Прогрес у сфері вимірювальних технологій та інформаційних систем відкриває нові перспективи. Це стосується реалізації сучасних інструментально-програмних комплексів, спрямованих на об'єктивну оцінку рівня безпеки та якості руху поїздів та розроблення превентивних заходів для мінімізації ризику аварійних ситуацій.

У зв'язку з вищезазначеним, вдосконалення методології, інструментарію та програмного забезпечення для експериментального визначення ключових показників безпеки та якості руху вантажних вагонів

набуває критичної актуальності. Це є пріоритетним напрямком для підвищення надійності залізничних перевезень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження [1] присвячено методиці визначення сил колесо-рейка для пасажирських вагонів шляхом реєстрації деформацій коліс у контрольних точках. Автори не розглядають застосування цього підходу до вантажних вагонів.

У роботі [2] аналізуються сучасні вимірювальні комплекси для оцінки динаміки рухомого складу на основі рамних сил. Робота не охоплює паралельний моніторинг показників у різних зонах вагона.

Праця [3] досліджує критерії взаємодії пантографа з контактною мережею, аналіз причин порушень струмознімання та розроблено експериментальний комплекс для оцінки параметрів струмоприймачів. Питання вимірювання інших параметрів безпеки (наприклад, запасу стійкості) не висвітлено.

В роботі [4] автори аналізують динаміку системи колесо-рейка та знос коліс вантажних вагонів і вагонів метро. Вплив зносу на безпеку руху не досліджувався.

В [5] запропоновано інноваційний метод діагностики (Hunting Coefficient), заснований на аналізі поперечних коливань колісних пар. Можливість використання методу при прийманні нової техніки не описана.

У статті [6] розроблено алгоритм зворотного визначення сил взаємодії (коефіцієнт сходу) з використанням сліпого розділення сигналів (BSS) та аналізу незалежних компонент (ICA). Валідація на моделі колеса MCE підтвердила точність (<5%) для вантажних вагонів.

У праці [7] виконано моделювання динаміки вагона з візком Y25 (порожнього/завантаженого) у кривих різних радіусів на різних швидкостях. Параметри взаємодії колеса з рейкою не оцінювалися.

Авторами у роботі [8] порівняно динамічні характеристики трьох типів вантажних візків на прямій ділянці (40-120 км/год). Відчутних відмінностей не виявлено. Запропоновано оптимізацію підвіски для покращення динаміки. Методика порівняння не наведена.

В праці [9] описано систему реального часу для моніторингу швидкості, ваги, осей поїзда та розрахунку статичного навантаження на вісь з використанням оптичних датчиків.

В [10] досліджено застосування сендвіч-панелей у кузовах для зниження навантажень. Напруження нижчі на 3.5% від традиційних конструкцій. Вплив на динамічні показники не аналізувався.

В роботі [11] запропоновано модифікацію вагона-хопера (поділ кузова на секції) для мультивантажних перевезень. Міцність підтверджена методом кінцевих елементів. Динамічні характеристики модифікованої конструкції не досліджені.

У статті [12] досліджено вплив бокового зміщення візків напіввагона на динаміку та взаємодію з

колесою. Встановлено залежності від кута повороту кузова, швидкості руху та кривизни колії.

Авторами у роботі [13] розроблено методику оцінки причин втрати стійкості вантажних вагонів. Комп'ютерне моделювання виявило критичний вплив зносу клинів гасників коливань на стійкість порожніх вагонів.

В праці [14] побудовано нелінійну модель демпфування (114 ступенів свободи) для вантажних вагонів з урахуванням геометрії клинів, умов ковзання та контакту. Сили колесо-рейка розраховані за алгоритмом FASTSIM. Експериментальні методи оцінки безпеки не описані.

Авторами у роботі [15] запропоновано концепцію системи підвищення безпеки переїздів на основі аналізу вібраційних хвиль та автономного виявлення руху.

В роботі [16] проведено комп'ютерне моделювання умов сходу з рейок та впливу технічного стану гасників на безпеку пасажирських вагонів.

У статті [17] досліджено вплив типу рухомого складу та швидкості на динаміку та взаємодію з колесою за допомогою моделювання просторових варіацій зчеплення п'яти вагонів. Проблеми експлуатаційного моніторингу не розглянуті.

В праці [18] експериментально визначено спектр напружень у листових ресорах вантажних вагонів, що корелює з навантаженням на колісні пари (данні з тензодатчиків). Вплив на динаміку руху не досліджувався.

В роботі [19] порівняно динаміку вагонів із різними типами демпфування (сухе тертя / в'язке гасіння). Вплив типу демпфера на запас стійкості колісної пари не аналізувався.

У статті [20] розроблено імітаційну модель позовжних сил у змішаних вантажних поїздах під час сортування під дощем. Оцінка динамічних показників окремих вагонів не здійснювалась.

Мета статті

Метою статті є висвітлення результатів роботи з розробки загальних вимог до мобільного програмно-апаратного комплексу для вимірювань та оцінки показників якості руху вантажних вагонів в умовах експлуатації, а також проведення випробувань нового універсального вантажного вагона за допомогою цієї системи.

Дана робота виконана з метою дослідження можливості впровадження мобільних систем діагностики в існуючий рухомий склад та оцінку роботи таких систем в умовах експлуатації.

Мобільний програмно-апаратний комплекс повинен включати в себе такі технічні і функціональні особливості:

- реалізація мобільного підходу – система забезпечує можливість збору даних безпосередньо в польових умовах, що зменшує потребу у використанні стаціонарного обладнання;

- інтеграція IoT-технологій – комплекс може використовувати датчики IoT для бездротової передачі даних у реальному часі на сервер для подальшої обробки;

- комплексний аналіз даних – поєднання кількох типів даних (вібраційний аналіз, механічні напруження тощо) в одній системі для більш точного діагностування;

- автономність і енергоефективність – система може бути обладнана автономними джерелами живлення, що дозволяє її використовувати в будь-яких умовах.

Виклад основного матеріалу

Спеціалізоване програмно-математичне забезпечення було розроблене для реєстрації та аналітичної оцінки динамічних показників руху залізничного рухомого складу в експлуатаційних умовах. Обробка експериментальних даних здійснюється у програмному середовищі LabView, де інтегровані спеціалізовані алгоритми для аналізу результатів динамічних випробувань.

Функціональне призначення ПЗ зводиться до: виявлення кореляційних залежностей між коливальними процесами в несучій конструкції рухомого складу; ідентифікації характерних частот взаємодії конструктивних елементів; кількісної оцінки інтенсивності цих взаємодій.

Для реалізації цих завдань застосовуються методи кореляційного аналізу та спектрального аналізу, що виконуються окремо для різних структурних компонентів. Вимірювальні дані, отримані під час моніторингу, структуровані у вигляді багатовимірного часового ряду. Кожен вимірювальний канал генерує окремий одновимірний часовий ряд, що формує рядок цієї багатовимірної структури.

Структура програмного комплексу (рис. 1) базується на модульному принципі та включає п'ять ключових програмних модулів. Кожен модуль відповідає за строго визначений етап обробки вхідних даних.

Запропоноване рішення дає можливість виконувати поглиблений аналіз динамічних показників дослідного рухомого складу, забезпечуючи покращення точності оцінювання його стану.

Одна з стандартних функцій LabView, які застосовуються для аналізу даних випробувань, – цифрова фільтрація сигналів. Цифровий фільтр це будь-яка цифрова система, яка згідно заданого оператора $y(n) = F\{\tilde{x}(n)\}$ здійснює перетворення на її вході первинного сигналу $\tilde{x}(n) = x(n) + \xi(n)$ – цифрового сигналу $x(n)$ або його параметрів $\xi(n)$.

Під час оцінки показників динаміки та міцності, використовується фільтр Баттерворта. Функція передачі фільтра-прототипу Баттерворта (Butterworth filter) наведена нижче

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}}, \quad (1)$$

де ω_0 – частота зрізу (для фільтра-прототипу вона дорівнює 1 рад/с), n – порядок фільтра. Коефіцієнт передачі на нульовій частоті дорівнює 1, а на частоті зрізу незалежно від порядку фільтра становить $1/\sqrt{2} \approx 0,707 \approx 3\text{дБ}$. При $\omega \rightarrow \infty$ амплітудно-частотна характеристика наближається до нуля. Амплітудно-частотна характеристика фільтра Баттерворта є максимально плоскою при $\omega = 0$ та $\omega = \infty$. В цілому амплітудно-частотна характеристика рівномірно спадає від одиниці до нуля при зміні частоти від нуля до нескінченності.



Рис. 1 – Структура програмного забезпечення

Для забезпечення безпеки руху використовується важливий критерій – коефіцієнт запасу стійкості ($k_{\text{ст}}$) колісної пари. Його основна функція – оцінити стійкість колісної пари проти сходження з рейок у разі вкочування гребеня колеса на головку рейки. Прогнозування загрози сходу здійснюється шляхом перевірки значення $k_{\text{ст}}$. Розрахунок $k_{\text{ст}}$ виконується за формулою (2) при найбільш небезпечних сполученнях горизонтальних (P_0) та вертикальних (P_B) сил, прикладених до колісної пари:

$$k_{\text{ст}} = \frac{tg\beta - f_{TP}}{1 + f_{TP} \cdot tg\beta} \cdot \frac{P_B}{P_0} \geq [k_{\text{ст}}], \quad (2)$$

де β – кут нахилу до горизонту твірної конусоподібної поверхні гребеня колеса; f_{TP} – коефіцієнт тертя ковзання поверхонь коліс і рейок, що взаємодіють; P_B –

вертикальна складова сил, що діють від коліс на рейки; P_6 – горизонтальна складова сил взаємодії колеса з рейкою, яка діє одночасно з силою P_B .

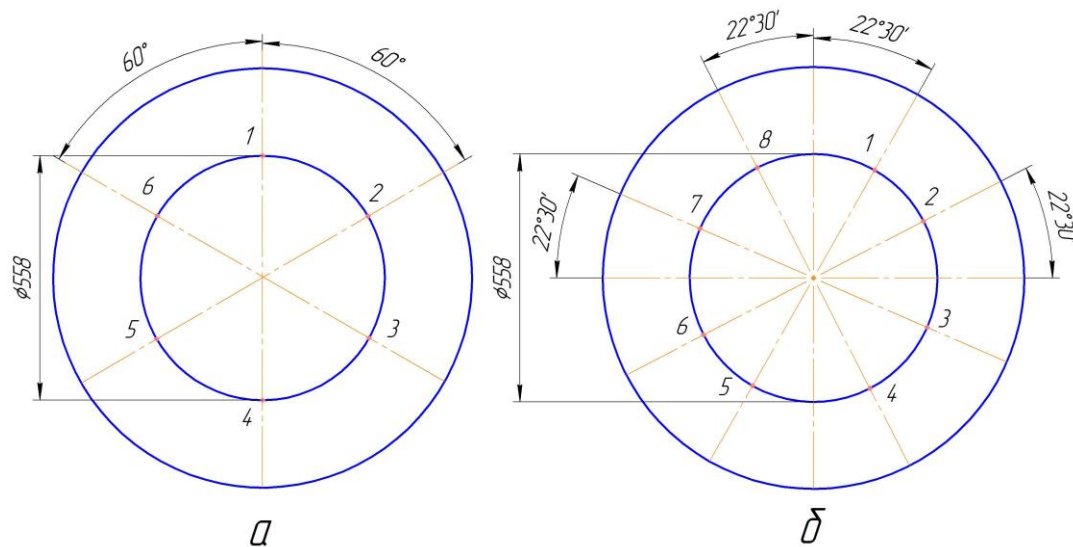


Рис. 2 – Схема розміщення тензорезисторів для вимірювання деформацій: а – від вертикального навантаження; б – від бокового навантаження

Визначення зон деформаційної чутливості диска колеса. Розташування тензорезисторів на диску колісної пари та їх підключення до вимірювальної схеми мають забезпечувати:

- достатню чутливість до вимірюваної сили;
- мінімізацію впливу сил інших напрямків.

Для окремої реєстрації сил, що діють на колісну пару, необхідно вибрати такі ділянки диска, де кожен тензорезистор реагує лише на навантаження певного напрямку. Чутливі зони були визначені шляхом аналізу напружено-деформованого стану колісної пари за допомогою методу кінцевих елементів.

На рис. 2 показано уточнені місця розміщення точок вимірювання на диску колеса, які найбільш чутливі до вертикального та бокового навантажень, згідно з результатами розрахунків.

На підставі експериментальних даних було виявлено зони максимальних напружень на диску колеса, що виникають під дією бокових (горизонтальних) та вертикальних навантажень. Ці результати дали змогу розробити оптимальну схему розміщення тензорезисторів на дисках коліс для точного визначення величини вертикального та бокового навантажень, які діють на колісні пари.

Для калібрування тензометричних систем на колесах використовуються спеціалізовані пристрої, які моделюють бокове навантаження у зоні, максимально наближеній до контакту колеса з рейкою, та забезпечують прикладання вертикального навантаження.

Апаратна частина системи контролю включає:

- первинні датчики (тензорезистори, низькочастотні акселерометри, датчики переміщень);

- GPS-приймач для позиціонування;
- аналогові лінії передачі даних (екрановані 6-жильні кабелі, стійкі до мастил, з робочою напругою до 10 В);

- підсистеми збору та обробки даних.

Кабельні компоненти зберігають свої властивості в діапазоні температур $-40^{\circ}\text{C} \dots +80^{\circ}\text{C}$ та відповідають 2-му класу гнучкості.

Функціональні можливості мобільної системи:

- оцінка міцності та безпеки руху в режимі реального часу;
- автономні вимірювання фізичних параметрів (деформації, прискорення, переміщення) з подальшою статистичною обробкою;
- аналіз впливу швидкості руху на контрольовані параметри з використанням GPS-даних.

Система призначена для:

- динамічної діагностики рухомого складу;
- оцінки навантажень на ходові частини;
- контролю якості виконаного ремонту;
- визначення залишкового ресурсу несівних конструкцій;
- проведення експлуатаційних випробувань.

Застосування мобільної системи в умовах експлуатації. Для натурних випробувань було обрано універсальний багатофункціональний вагон моделі 10-8006-У, призначений для перевезення тарно-штучних, зернових та інших вантажів широкої номенклатури, що потребують захисту від атмосферних опадів. Даний вагон зпроектовано та збудовано філією «Панютинський вагоноремонтний завод» АТ «Укрзалізниця» (рис. 3).



Рис. 3. – Універсальний багатофункціональний вагон моделі 10-8006-У

Для дослідження динамічних навантажень на несучі конструкції вагона було встановлено тензометричні датчики двох типів: на елементах кузова для вимірювання напружень та на дисках колісних пар для оцінки стійкості руху. Згідно з розробленою схемою розміщення (рис. 2), тензорезистори на колесах дозволяють реєструвати критичні значення коефіцієнта запасу стійкості. Доповнює систему моніторингу набір акселерометрів, встановлених як на підресорених, так і на жорстких елементах ходової частини.

Мобільна система збору даних інтегрує показання всіх датчиків через спеціалізовані кабельні мережі. Для обґрунтування вибору точок моніторингу попередньо виконано комплекс розрахунків міцності згідно з вимогами ДСТУ 7598, доповнений комп'ютерним моделюванням у програмному середовищі SolidWorks Simulation. Результати цих досліджень візуалізовані на рис. 4 та 5, де чітко ідентифіковані зони максимальних напружень несучої конструкції зерновоза та оптимальні місця розміщення вимірювальних датчиків.

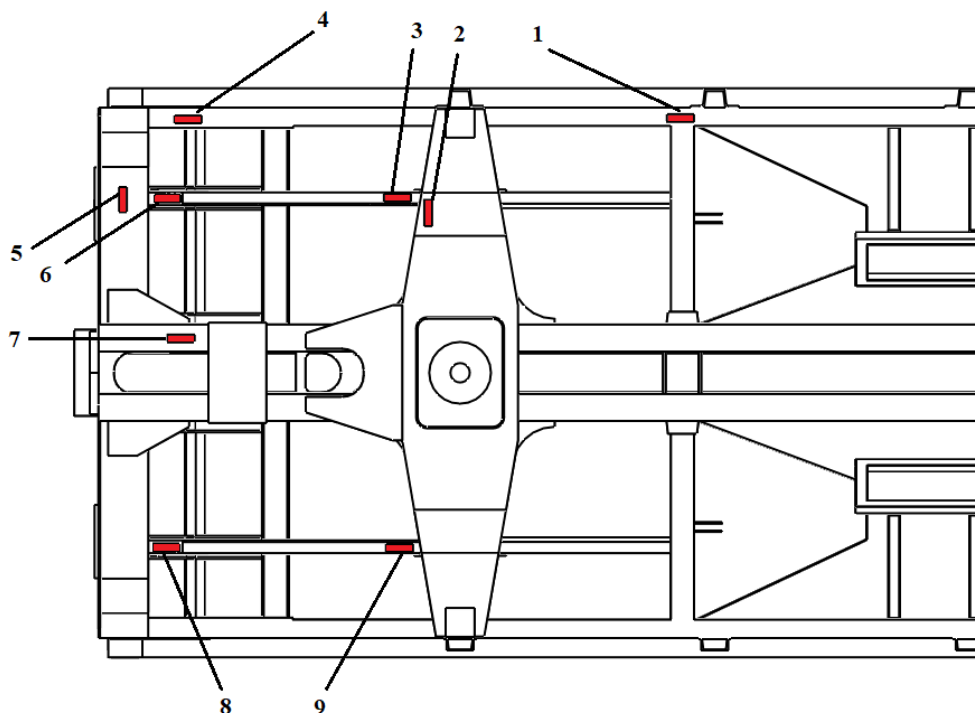


Рис. 4 – Місця встановлення тензорезисторів

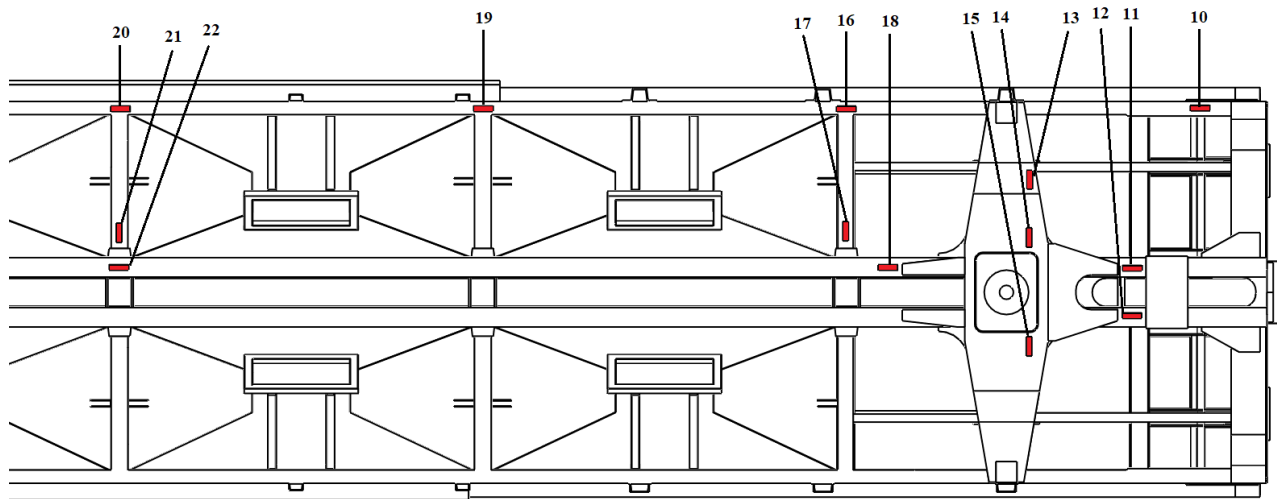


Рис. 5 – Місця встановлення тензорезисторів

Дослідному універсальному багатофункціональному вагону моделі 10-8006-У проведено ходові міцнісні та динамічним випробуванням у завантаженому стані. Метою досліджень було визначення ключових показників безпеки та якості руху, зокрема:

динамічних напружень, коефіцієнта запасу стійкості та прискорень елементів вагона. Вимірювання проводилися за допомогою мобільної системи в умовах реальної експлуатації. Отримані результати представлені в таблицях 1, 2.

Таблиця 1

Результати визначення динамічних напружень (ходові міцнісні випробування)

Показник	Нормативне значення, МПа	Фактичне значення, МПа
Динамічні напруження:		
Канал 1		
Канал 2		41,8
Канал 3		14,3
Канал 4		6,4
Канал 5		1,7
Канал 6		5,7
Канал 7		11,1
Канал 8		16,7
Канал 9	для сталі S355 319,5	20,4
Канал 10	Згідно ДСТУ 7598	11,8
Канал 11		7,8
Канал 12	для сталі 09Г2С	14,3
Канал 13	310,5 Згідно ДСТУ	23,8
Канал 14	7598	19,8
Канал 15		3,3
Канал 16		13,9
Канал 17		4,0
Канал 18		15,4
Канал 19		32,4
Канал 20		21,4
Канал 21		34,2
Канал 22		20,8
		27,1

Таблиця 2

Результати визначення показників якості руху (ходові динамічні випробування)

Показник	Нормативне значення	Параметри при швидкості, км/год				
		40	60	80	100	120
Коеф. верт. динаміки кузова, не більше	Відмінно 0,20 Добре 0,35 Задовільно 0,40 Допустимо 0,65	0,11	0,15	0,20	0,25	0,3
Коеф. верт. динаміки необресореної рами візка, не більше	Відмінно 0,50 Добре 0,70 Задовільно 0,80 Допустимо 0,85	0,2	0,22	0,30	0,33	0,37
Коеф. гориз. динаміки кузова, не більше	Відмінно 0,20 Добре 0,25 Задовільно 0,30 Допустимо 0,38	0,07	0,08	0,07	0,09	0,11
Коеф. запасу стійкості колеса від сходу з рейок, не менше	1,3	2,5	2,2	2,2	2,3	2,0

Висновки

Запропоновано програмно-математичний апарат для визначення показників якості та безпеки руху, що забезпечує вимірювання з розширеною невизначеністю 2,1% (при максимально допустимих 5%) за допомогою мобільних систем під час експлуатації. Це досягається завдяки використанню високоточних акселерометрів для вимірювання віброприскорень та сучасного реєструючого обладнання.

Визначено області залежності виникнення напружень на диску стандартного вагонного колеса під впливом вертикального та горизонтального силового навантаження. Запропоновано схему розташування тензорезисторів, яка дозволяє визначати контактні сили взаємодії коліс і рейок. Це забезпечує можливість безпосереднього оцінювання фактичного запасу стійкості колісних пар проти сходу з рейок.

3. Запропоновано загальні вимоги до мобільної системи для визначення показників якості та безпеки руху вантажних вагонів в умовах експлуатації. Ця система дозволяє виконувати контроль показників якості та безпеки руху дослідного рухомого складу в умовах експлуатації без залучення вагонів-лабораторій.

5. Проведено ходові динамічні та ходові міцнісні випробування універсального багатофункціонального вагона моделі 10-8006-У. Вимірювання дослідних показників якості та безпеки руху проведено за допомогою розробленого мобільного програмно-апаратного комплексу для вимірювань та оцінки показників якості руху вантажних вагонів в умовах експлуатації.

Перелік використаних джерел

[1] Fomin O., Prokopenko P. Assessment of the quality indicators of the carriage movement by directly measuring the forces of interaction between the wheels and rails. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2024. Vol. 26 (3). Pp. 155-166. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.030>.

[2] Determination of safety indicators of the freight wagons by mobile systems / O. Fomin et al. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. Pp. 516-522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.073>.

[3] Study of the basic criteria of the pantograph and overhead line interaction in operating conditions / O. Fomin et al. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 19, Article 101336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101336>.

[4] The effectiveness of different wear indicators in quantifying wear on railway wheels of freight wagons / P.A. de Paula Pacheco et al. *Railway Engineering Science*. 2024. Vol. 32(3). Pp. 307-323. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00334-8>.

[5] A diagnostic method of freight wagons hunting performance based on wayside hunting detection system / Q. Wang et al. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2024. Vol. 227, Article 114274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114274>.

[6] Bižić M., Petrović D. Algorithm for inverse determination of derailment coefficient by using instrumented wheelsets. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2022. Vol. 29(5). Pp. 503-517. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2022.10054032>.

[7] Calculation of basic indicators of running safety on the example of a freight wagon with the Y25 bogie / Dižo J., Blatnický M., Molnár D., Falendys A. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2022. Vol. 24(3). Pp. 259-266. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2022.3.B259-B266>.

[8] Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / S. Myamlin et al. *Transport*. 2015. Vol. 30(1). Pp. 88-92. DOI: <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1020565>.

[9] Design and development of wagon load monitoring system using fibre Bragg grating sensor / M. Suchandana et al. *Optical Fiber Technology*. 2025. Vol. 90.

- Article 104149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2025.104149>.
- [10] A study of the transverse loading of an open wagon body with sandwich-panel walls / Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Dizo J. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. Pp. 66-73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.011>.
- [11] The Current State and Trends in the Development of Non-Contact Temperature Monitoring of the Railway Rolling Stock Elements / V. Bezlutsky et al. *Transport Means : Proceedings of the 28th International Scientific Conference, Kaunas, Lithuania, 2-4 October 2024*. Pp. 1008-1013. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P1008-1013>.
- [12] Shvets A. Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie. *Advanced Mathematical Models and Applications*. 2021. Vol. 6(1). Pp. 45-58.
- [13] Analysis of the conditions for the exhaustion of the stability margin in the rail track of freight cars with three-piece bogies / Domin Y., Domin R., Cherniak G., Nozhenko V. *Archives of Transport*. 2021. Vol. 57(1). Pp. 119-129. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.8042>.
- [14] Hazrati Ashtiani I., Rakheja S., Ahmed A.K.W. Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight wagons with three-piece bogies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021. Vol. 231(8). Pp. 877-891. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716647095>.
- [15] Temperature Loads in Railway Structures and General Engineering Practice / V. Bezlutsky et al. *Transport Means : Proceedings of the 28th International Scientific Conference, Kaunas, Lithuania, 2-4 October 2024*. Pp. 581-586. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P581-586>.
- [16] Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways / R. Domin et al. *Archives of Transport*. 2016. Vol. 40(4). Pp. 15-27. DOI: <https://doi.org/10.5604/08669546.1225459>.
- [17] Research of dynamic indicators and influence of different types of rolling stock on railway track / A. Shvets et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985 (1). Article 012010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012010>.
- [18] Experiments for a fatigue damage analysis applied in leaf spring suspensions of freight wagons / V.M.G. Gomes et al. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 54. Pp. 561-567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.119>.
- [19] Evaluation of dynamics of a freight wagon model with viscous damping / R. Melnik et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (22). Article 10624. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210624>.
- [20] Effects of mixed marshalling modes on longitudinal freight train dynamics / Liangliang Y., Shihui L., Maoha F., Chen W. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2024. Vol. 237 (8). Pp. 1060-1071. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097231151477>.

RESEARCH OF THE STRENGTH AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A UNIVERSAL FREIGHT WAGON USING A MOBILE SYSTEM

Fomin O.V.	D.Sc. (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2387-9946 , e-mail: fomin1985@ukr.net ;
Prokopenko P.M.	PhD (Railway transport), head of the engineering department, Branch «Scientific-Research and Design and Technological Institute of Railway Transport» of JSC «Ukrainian Railways», Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1631-6590 , e-mail: prokopenko1520mm@gmail.com ;
Klymash A.O.	PhD (Engineering), associate professor, East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4055-1195 , e-mail: klimash@snu.edu.ua ;
Kuzmenko S.V.	PhD (Engineering), associate professor, East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0871-9864 , e-mail: kuzmenko@snu.edu.ua

This study is dedicated to advancing methodological approaches and instrumentation for the experimental analysis of structural integrity and running quality indicators pertaining to newly manufactured freight wagons, with the ultimate goal of certifying their operational suitability on public railway networks. This necessitates a comprehensive update of foundational theoretical principles, established testing methodologies, and measurement equipment. A central proposal involves the strategic replacement of dedicated laboratory wagons with advanced mobile digital measurement systems. Furthermore, the work introduces a novel approach for evaluating critical running quality metrics - specifically, the

stability margin coefficient and vertical dynamics coefficients - achieved through the precise measurement of stress distributions within the wheel disc of a freight wagon's wheel set. The research employs an empirical methodology focused on quantifying wheel-rail interaction forces. This is accomplished by capturing and analyzing deformation patterns within critical structural zones of the wheel, enabling the subsequent assessment of wagon running quality performance under actual service conditions. Additionally, the work rigorously substantiates the imperative need for modernizing both software (SW) and methodological solutions. This modernization is essential for accurately evaluating the dynamic characteristics of both newly constructed and modernized rolling stock, currently being produced by Ukrainian wagon manufacturing facilities. The research provides robust justification for the operational and technical feasibility of transitioning from traditional laboratory wagons to sophisticated, compact mobile diagnostic complexes. This transition is demonstrated to significantly enhance both the operational efficiency (responsiveness) and the reliability (accuracy) of testing procedures. Critical zones within the wheel disc susceptible to stress generation under the influence of vertical (normal) and lateral (horizontal) force loadings have been definitively identified and mapped. An optimized, scientifically validated scheme for the strategic placement of strain gauges (tensometric sensors) is proposed to ensure high-fidelity determination of wheel-rail contact forces. The study culminates in the formulation of universal, comprehensive technical specifications and requirements for mobile measurement systems. These systems are specifically engineered for the operational monitoring of freight wagon running quality during active revenue service, as well as during critical commissioning and acceptance testing phases required for authorizing new wagons onto public infrastructure. The proposed integrated measurement system has undergone successful field-testing and validation under real-world operational conditions simulating typical freight wagon usage. The empirical results and specifications obtained enable the precise definition of core technical parameters necessary for the development and deployment of effective mobile diagnostic complexes. These data sets hold considerable weight and are fundamentally important in the engineering design process of advanced monitoring systems destined for railway transport applications. Such systems are intrinsically oriented towards rigorous safety assessment, achieved through the continuous, real-time monitoring of structural health (condition) and dynamic running behaviour. The practical implementation of the proposed methodologies and systems is projected to directly and materially contribute to the reduction of accident risks across railway networks, thereby enhancing overall operational safety.

Keywords: testing, freight wagon, strength, running safety, mobile system, railway transport.

References

- [1] O. Fomin, and P. Prokopenko, "Assessment of the quality indicators of the carriage movement by directly measuring the forces of interaction between the wheels and rails," *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, vol. 26(3), pp. 155-166, 2024. doi: 10.26552/com.C.2024.030.
- [2] O. Fomin, P. Prokopenko, Y. Medvediev, and L. Degtyareva, "Determination of safety indicators of the freight wagons by mobile systems," *Procedia Structural Integrity*, vol. 59, pp. 516-522, 2024. doi: 10.1016/j.prostr.2024.04.073.
- [3] O. Fomin, P. Prokopenko, S. Kara, V. Píštěk, and P. Kučera, "Study of the basic criteria of the pantograph and overhead line interaction in operating conditions," *Results in Engineering*, vol. 19, article 101336, 2023. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101336.
- [4] P.A. Paula Pacheco et al., "The effectiveness of different wear indicators in quantifying wear on railway wheels of freight wagons," *Railway Engineering Science*, vol. 32(3), pp. 307-323, 2024. doi: 10.1007/s40534-024-00334-8.
- [5] Q. Wang, D. Li, J. Zeng, X. Peng, L. Wei, and W. Du, "A diagnostic method of freight wagons hunting performance based on wayside hunting detection system," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 227, article 114274, 2024. doi: 10.1016/j.measurement.2024.114274.
- [6] M. Bižić, and D. Petrović, "Algorithm for inverse determination of derailment coefficient by using instrumented wheelset," *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, vol. 29(5), pp. 503-517, 2022. doi: 10.1504/IJHVS.2022.10054032.
- [7] J. Dižo, M. Blatnický, D. Molnár, and A. Falendysh, "Calculation of basic indicators of running safety on the example of a freight wagon with the Y25 bogie," *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, vol. 24(3), pp. 259-266, 2022. doi: 10.26552/com.C.2022.3.B259-B266.
- [8] S. Myamlin, L. Lingaitis, S. Dailydka, G. Vaičiūnas, M. Bogdevičius, and G. Bureika, "Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie," *Transport*, vol. 30(1), pp. 88-92, 2015. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565.
- [9] M. Suchandana, S. Preeta, A. Abdullah, A. Tahani, and U. Anup, "Design and development of wagon load monitoring system using fibre Bragg grating sensor," *Optical Fiber Technology*, vol. 90, article 104149, 2025. doi: 10.1016/j.yofte.2025.104149.
- [10] J. Gerlici, A. Lovska, G. Vatulia, and J. Dizo, "A study of the transverse loading of an open wagon body with sandwich-panel walls," *Procedia Structural Integrity*, vol. 59, pp. 66-73, 2024. doi: 10.1016/j.prostr.2024.04.011.
- [11] V. Bezlutsky, O. Pipchenko, Ie. Medvediev, O. Padchenko, A. Lytvynenko, and S. Sova, "The Current State and Trends in the Development of Non-Contact Temperature Monitoring of the Railway Rolling Stock

- Elements,” in *Proc. of the 28th Int. Sci. Conf. «Transport Means»*, Kaunas, Lithuania, Oct. 2-4, 2024, pp. 1008-101. doi: 10.5755/e01.2351-7034.2024.P1008-1013.
- [12] A. Shvets, “Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie,” *Advanced Mathematical Models and Applications*, vol. 6(1), pp. 45-58, 2021.
- [13] Y. Domin, R. Domin, G. Cherniak, and V. Nozhenko, “Analysis of the conditions for the exhaustion of the stability margin in the rail track of freight cars with three-piece bogies,” *Archives of Transport*, vol. 57(1), pp. 119-129, 2021. doi: 10.5604/01.3001.0014.8042.
- [14] I. Hazrati Ashtiani, S. Rakheja, and A.K.W. Ahmed, “Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight wagons with three-piece bogies,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 231(8), pp. 877-891, 2017. doi: 10.1177/0954409716647095.
- [15] V. Bezlutsky, O. Melnyk, T. Emelyanova, V. Lisnychiy, A. Lytvynenko, and S. Sova, “Temperature Loads in Railway Structures and General Engineering Practice,” in *Proc. of the 28th Int. Sci. Conf. «Transport Means»*, Kaunas, Lithuania, Oct. 2-4, 2024, pp. 581-586, 2024. doi: 10.5755/e01.2351-7034.2024.P581-586.
- [16] R. Domin, I. Domin, G. Cherniak, A. Mostovych, V. Konstantidi, and P. Gryndei, “Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways,” *Archives of Transport*, vol. 40(4), pp. 15-27, 2016. doi: 10.5604/08669546.1225459.
- [17] A. Shvets, O. Bolotov, A. Percevoj, V. Ghlukhov, O. Bolotov, and L. Saparova, “Research of dynamic indicators and influence of different types of rolling stock on railway track,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 985(1), article 012010, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/985/1/012010.
- [18] V.M.G. Gomes, N.M.P. Pinto, P.A. Montenegro, J.A.F.O. Correia, R. Calçada, and A.M.P. Jesus, “Experiments for a fatigue damage analysis applied in leaf spring suspensions of freight wagons,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 54, pp. 561-567, 2024. doi: 10.1016/j.prostr.2024.01.119.
- [19] R. Melnik, S. Koziak, J. Seńko, J. Dižo, and J. Caban, “Evaluation of dynamics of a freight wagon model with viscous damping,” *Applied Sciences*, vol. 14(22), article 10624, 2024. doi: 10.3390/app142210624.
- [20] Y. Liangliang, L. Shihui, F. Maoha, and W. Chen, “Effects of mixed marshalling modes on longitudinal freight train dynamics,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 237(8), pp. 1060-1071, 2024. doi: 10.1177/09544097231151477.
- Стаття надійшла 26.07.2025
Стаття прийнята 15.08.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Дослідження міцності та динамічних характеристик універсального вантажного вагона мобільною системою / Фомін О. В., Прокопенко П. М., Климаш А. О., Кузьменко С. В. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 301-310. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344983>.

274 АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.017:629.083:681.518

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344984

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ЗАСОБІВ ЗБИРАННЯ І ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ В СТРУКТУРІ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Матейчик В.П.	д-р техн. наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3683-7246 , e-mail: wmate@ukr.net ;
Навроцький А.В.	аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0188-4630 , e-mail: andrewnav888@gmail.com

У статті розглянуто особливості взаємодії засобів збору та обробки інформації в структурі апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації транспортних засобів. Визначено, що ефективність функціонування сучасних транспортних засобів значною мірою залежить від рівня інтеграції технічних засобів контролю, систем діагностики та засобів передачі інформації у єдиному апаратно-інформаційному комплексі. Проведено аналіз останніх досліджень у сфері побудови систем моніторингу технічного стану та визначено науково-технічні передумови для удосконалення процесів збору, обробки та інтерпретації даних. Запропоновано підхід до систематизації елементів апаратного забезпечення на основі морфологічного аналізу, що дозволяє формувати раціональні конфігурації компонентів системи моніторингу з урахуванням функціональних зв'язків між підсистемами. Розроблено узагальнену модель взаємодії інформаційних і технічних засобів, яка враховує вплив зовнішніх умов експлуатації транспортних засобів та забезпечує підвищення достовірності контролю параметрів їх технічного стану. Сформовано DFD-діаграму функціонування інформаційної системи оцінювання і забезпечення отримання параметрів технічного стану транспортних засобів на основі моніторингу їх експлуатації. Розроблений і показаний варіант забезпечення зв'язку основних складових діаграми інформаційної системи з функціональними елементами розробленої морфологічної формули. В роботі проаналізовані варіанти конфігурацій для задоволення конкретних потреб в встановлених експлуатаційних умовах. Виконана оцінка доцільності використання основних складових діаграми інформаційної системи з функціональними елементами розробленої морфологічної формули. Результати дослідження можуть бути використані для проектування, модернізації та оптимізації інформаційних систем моніторингу транспортних засобів різного призначення. Практичне впровадження запропонованих підходів сприятиме підвищенню ефективності експлуатації, зниженню витрат на технічне обслуговування та покращенню безпеки транспортних процесів.

Ключові слова: транспортний засіб, інформаційна система моніторингу, апаратне забезпечення, збір та обробка інформації, морфологічний аналіз, технічний стан.

Постановка проблеми

Підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів (ТЗ) в сучасних умовах потребує безперервного отримання достовірної інформації про їх технічний стан, роботу основних вузлів та агрегатів [1]. Реалізація цього завдання можлива за рахунок упровадження новітніх технологічних та інформаційних рішень, спрямованих на організацію систематичного моніторингу параметрів функціонування ТЗ [2-7].

Сучасні ТЗ характеризуються високим рівнем автоматизації та оснащені великою кількістю електронних і комп'ютеризованих систем, які здійснюють контроль за процесами експлуатації, забезпечують інформацію технічних і технологічних операцій, оптимізують режими роботи, підвищують надійність і безпеку руху [8-14]. Ефективна взаємодія цих систем потребує узгодженого функціонування апаратних і програмних засобів збору, обробки та передачі інформації у складі єдиної інформаційної системи моніторингу (ИСМ) [15-17]. Водночас актуальним завданням є

оптимізація структурної взаємодії засобів збору та обробки даних, а також обґрунтування технічних рішень щодо систематизації схем апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ. Це дозволить підвищити ефективність контролю технічного стану ТЗ, зменшити ризики відмов та оптимізувати процеси технічного обслуговування.

Контроль і моніторинг транспорту сьогодні розглядаються як комплексне технічне рішення, що забезпечує спостереження за місцезнаходженням, переміщенням і технічним станом ТЗ. Системи дистанційного моніторингу мають практичну цінність у вирішенні широкого кола технічних, економічних, логістичних і соціальних завдань [18-20]. Вони дозволяють у режимі реального часу визначати координати транспортного засобу, швидкість руху, витрату пального, збирати статистичні дані для побудови оптимальних маршрутів, контролювати дотримання графіків руху, а також підвищувати безпеку перевезень завдяки автоматичній передачі інформації про аварійні ситуації [8-15].

Для забезпечення належної якості функціонування таких систем необхідно враховувати вимоги до апаратного забезпечення, яке відповідає за надійний збір, передавання та обробку даних у різних експлуатаційних умовах. Існуючі на ринку технологічні рішення спрямовані на досягнення спільної мети – забезпечення оперативного отримання достовірних даних про технічний стан і місцезнаходження ТЗ, що дає змогу підвищити ефективність його використання та задовольнити потреби користувачів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Ефективність функціонування ТЗ, як складної технічної системи, визначається насамперед його технічним станом [1]. У зв'язку з цим актуальним завданням є забезпечення раціонального управління технічним станом у процесі експлуатації [2-5]. Управління роботою ТЗ здійснюється на основі інформації, отриманої шляхом моніторингу, діагностування та прогнозування його ключових параметрів. Стан ТЗ суттєво залежить від умов навколишнього середовища, дорожньої інфраструктури, режимів використання та інших експлуатаційних чинників. Як показують результати досліджень [1, 4, 5], зовнішнє середовище може спричинити стохастичні відхилення в первинних даних, що зумовлює невизначеність у процесі оцінювання технічного стану.

Сучасні системи моніторингу поєднують в собі комплекс засобів збору, передачі та обробки інформації, які інтегруються як на борту ТЗ, так і в інфраструктурному середовищі. Це забезпечує створення єдиного інформаційного простору, який дозволяє отримувати достовірні дані про технічний стан ТЗ, умови його експлуатації та поведінку в реальному часі. Водночас складність побудови таких систем визначається різноманітністю технологій автомобілебудування, просторовою розгалуженістю транспортної мережі та відмінностями в умовах експлуатації. Ефективне поєднання технічних і інформаційних засобів у структурі апаратного забезпечення ІСМ є ключовим чинником підвищення точності контролю та надійності експлуатації ТЗ.

Одним із перспективних інструментів систематизації і структурного аналізу технічних рішень є метод морфологічного аналізу, відомий також як метод морфологічного ящика [1, 2, 17-20]. Його сутність полягає в декомпозиції досліджуваної системи на окремі функціональні елементи та пошуку оптимальних комбінацій для вирішення поставленої проблеми. Цей підхід поєднує методи класифікації та узагальнення, дозволяючи визначати функціональну значущість кожного елемента, його роль у системі та зв'язок із зовнішнім середовищем (надсистемою).

Морфологічний аналіз, як один із найефективніших методів структурного моделювання складних технічних систем, базується на формуванні морфологічної матриці, що відображає всі можливі варіанти

поєднання компонентів системи [18-20]. Його застосування потребує достатнього рівня знань про об'єкт дослідження [5, 14] і передбачає аналіз великої кількості альтернативних варіантів структурної побудови з метою вибору найбільш доцільного. Метод вимагає від дослідника міждисциплінарного підходу та знань із різних галузей техніки, інформатики та системного аналізу [12-15]. Автор методу Ф. Цвіккі довів його ефективність на практиці, побудувавши морфологічну матрицю для реактивних двигунів, що працюють на хімічному паливі [1-3, 5, 15-20].

У сучасних інформаційних системах моніторингу ТЗ цей підхід використовується для оптимізації взаємодії апаратних і програмних компонентів. Зокрема, інформаційні модулі системи подібних програм були адаптовані для вирішення завдань, сформованих у межах морфологічного підходу, із подальшою інтеграцією з функціональними елементами моніторингових систем [2, 3, 5, 6, 9, 13]. Для відображення логіки взаємодії потоків даних між компонентами розробляють DFD-діаграми функціонування систем моніторингу ТЗ, які демонструють структуру інформаційних зв'язків між підсистемами збору, обробки та зберігання даних [2-7].

Процеси обробки інформації в ІСМ доцільно розглядати як технологічні цикли, подібні до процесів переробки матеріальних ресурсів [2-9]. Поєднання методів структурного аналізу, морфологічного моделювання та інформаційного синтезу забезпечує створення цілісного уявлення про ТЗ як складну кіберфізичну систему.

Для опису предметної області ТЗ та його підсистем (двигуна, трансмісії, електронних контролерів), що функціонують у складі системи контролю та прогнозування, використовуються методи, орієнтовані на збір, аналіз і використання даних моніторингу з урахуванням потреб персоналу та умов експлуатації [2-12]. Первинний аналіз предметної області реалізується за допомогою DFD-діаграм потоків даних [2-7], які дозволяють візуалізувати структуру обміну інформацією між функціональними елементами систем моніторингу. Відповідно до логіки побудови систем моніторингу, джерелами первинної інформації є сенсори, контролери, бази даних та зовнішні суб'єкти моніторингу, які забезпечують передачу даних про технічний стан вузлів ТЗ і умови експлуатації [2-9]. Основні функції системи полягають у ідентифікації, контролі, діагностуванні та прогнозуванні технічного стану ТЗ у режимі реального часу.

Безперервний дистанційний моніторинг технічних параметрів сучасних ТЗ реалізується за рахунок роботи електронних систем керування вузлами та агрегатами. Ці системи виконують функції самодіагностики, визначають відхилення від номінальних параметрів і передають оператору інформацію про можливі відмови або критичні стани [1-12]. Запропонований науково-практичний підхід передбачає інформаційну інтеграцію між основними компонентами моніторингу: ТЗ, оператором, середовищем експлуатації та

транспортною інфраструктурою. Такий рівень взаємодії дозволяє підвищити оперативність прийняття рішень, ефективність технічного обслуговування та загальну надійність транспортної системи.

Мета статті

Метою дослідження є формування системної взаємодії засобів збирання і обробки інформації в структурі апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації ТЗ. Для її реалізації потрібно вирішити наступні завдання:

- розробити діаграму функціонування інформаційної системи оцінювання і отримання параметрів технічного стану транспортних засобів на основі моніторингу їх експлуатації в межах узагальненої морфологічної формули;
- визначити зв'язок основних складових діаграми інформаційної системи з функціональними елементами узагальненої морфологічної формули.

Матеріали та методи

На етапі підготовки до формування алгоритму адаптації структури апаратного забезпечення системи моніторингу для збирання і обробки інформації щодо процесів експлуатації ТЗ з використанням методу систематизації схем апаратного забезпечення було вирішено застосувати наступний підхід. Для реалізації виконання завдань і забезпечення оцінки доцільності використання того чи іншого апаратного забезпечення було запропоновано сформувати DFD-діаграму функціонування інформаційної системи оцінювання і забезпечення отримання параметрів технічного стану ТЗ на основі моніторингу їх експлуатації (рис. 1а) та зв'язок основних складових DFD-діаграми (інформаційної системи) з функціональними елементами узагальненої морфологічної формули (рис. 1б), яка детально описана в роботі [1].

Виклад основного матеріалу

У відповідності до положень і результатів виконаного морфологічного аналізу, в представленій системі моніторингу, виділено п'ять основних функціональних складових. Серед них [1]: засоби моніторингу (отримання) і передачі інформації про стан операторів; засоби моніторингу (отримання) і передачі інформації про технічний стан ТЗ, шляхом використання вбудованих в ТЗ та зовнішніх систем для оцінки роботи двигуна, трансмісії, ходової частини та механізмів його керування; засоби моніторингу (отримання) і передачі інформації про стан об'єктів перевезення на конкретному ТЗ; засоби моніторингу (отримання) і передачі інформації про параметри зовнішнього інфраструктурного середовища; засоби аналізу і використання інформації її споживачем(ами).

В морфологічній матриці, як і морфологічній формулі [1], відображаючи визначені основні варіанти реалізації 20 різних морфологічних ознак цих функціональних елементів, можливо сформувати для визначеного апаратного забезпечення відповідну численну кількість дійсних комбінацій конфігурацій системи у відповідності до компонентів (складових) розробленої DFD-діаграми (рис. 1). Запропонований метод може забезпечити необхідні рішення, що завжди будуть унікальними. При цьому, кожна конфігурація має свої переваги і недоліки для задоволення конкретних задач у встановлених дослідженням або оператором експлуатаційних умовах.

Узагальнена морфологічна формула комплексної системи моніторингу (1) показана в [1]. Аналогічно в роботі [1] показані і детально описані можливі варіанти реалізації складової формульного рішення (1) [1] поставленої задачі. Але, для реалізації інформаційної взаємодії в межах досліджуваної роботи, зв'язок основних складових DFD-діаграми (інформаційної системи) з функціональними елементами не розроблявся відповідно до положень і складових морфологічної формули (рис. 1б), що описана в роботі [1]. Тому сформуємо інформаційні залежності для деяких окремих варіантів структури апаратного забезпечення інтелектуальної системи моніторингу існуючих систем для забезпечення дослідження процесів експлуатації ТЗ (при здійсненні моніторингу оператора (водія) і самого ТЗ зі сканером-комунікатором через CAN-шину (з розгалуженою варіативною частиною). Виконаємо це для апаратних засобів моніторингу, аналогічних до роботи [1]. Для виконання формульного обґрунтування інформаційної взаємодії і адаптації структури апаратного забезпечення в межах розробленої DFD-діаграми виконуємо це для положень роботи [1] і функціональних елементів для рис. 1б. Для цього обираємо те ж саме апаратне обладнання, щодо якого виконувались попередні дослідження в роботі [1]. Це наступні варіанти реалізації складової формульного рішення (1) [1] щодо поставленої задачі:

1. Сканер-адаптер ELM 327;
2. Діагностичний прилад Launch;
3. Трекер Ruptela (Ruptela FM-Tco4 HCV / HCV 3G);
4. Тахограф VDO DTCO 3.0 1381 [21];
5. Система дистанційного контролю та прогнозування технічного стану автомобіля «ХНАДУ ТЕСА»;
6. Система дистанційного контролю та прогнозування технічного стану ТЗ і стану операторів «СМВ».

Розглянемо взаємодію перерахованих окремих апаратних засобів в межах морфологічної матриці структури апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації ТЗ для застосування в розробленій інформаційній системі і на DFD-діаграмі, що показана на рис. 1.

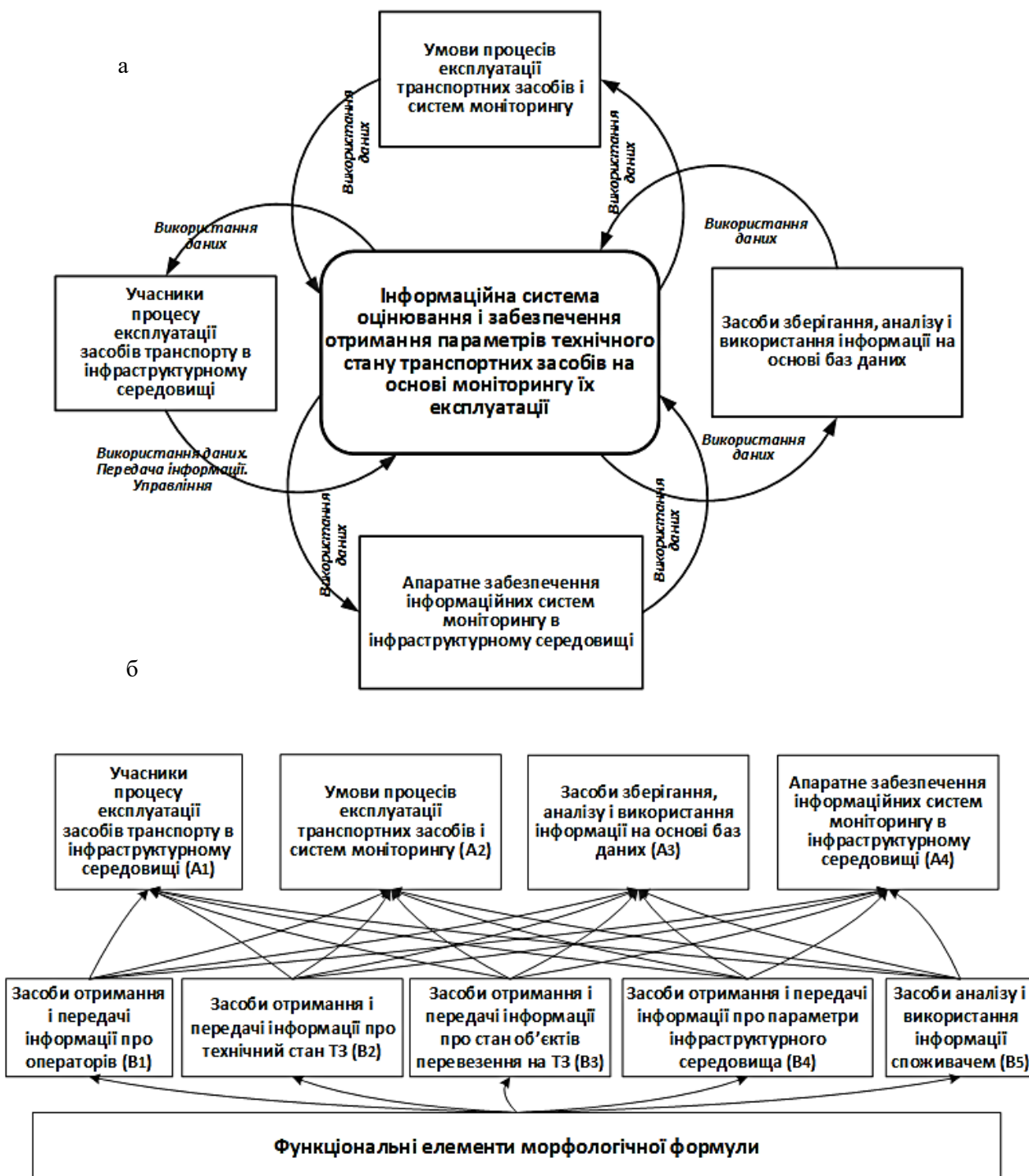


Рис. 1 – DFD-діаграма функціонування інформаційної системи оцінювання і забезпечення отримання параметрів технічного стану ТЗ на основі моніторингу їх експлуатації (а) та зв'язок основних складових DFD-діаграми (інформаційної системи) з функціональними елементами розробленої морфологічної формули (б)

Для складової DFD-діаграми «Учасники процесу експлуатації засобів транспорту в інфраструктурному середовищі (A1)» функціонування інформаційної системи оцінювання і забезпечення отримання параметрів

технічного стану транспортних засобів на основі моніторингу їх експлуатації маємо в залежності від особливостей формульного (1) виразу в роботі [1] наступну залежність:

$$\begin{cases} V_{A1(1)} = f(B_2 + B_{4(\min)} + B_5) \\ V_{A1(2)} = f(B_2 + B_{4(\min)} + B_5) \\ V_{A1(3)} = f(B_{1(\min)} + B_2 + B_3 + B_{4(\min)} + B_5) \\ V_{A1(4)} = f(B_1 + B_2 + B_{3(\min)} + B_4 + B_5) \\ V_{A1(5)} = f(B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \\ V_{A1(6)} = f(B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \end{cases} \quad (1)$$

де $V_{A1(1)} - V_{A1(6)}$ – функціональні залежності складових морфологічної матриці для реалізації взаємодії основних складових DFD-діаграми (інформаційної системи) з функціональними елементами розробленої морфологічної формули, відповідно до рис. 1б; $B_1 - B_5$ – складові структури апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації ТЗ в залежності від функціональних елементів морфологічної формули; $B_{i(\min)}$ – складові структури апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації ТЗ в залежності від функціональних елементів морфологічної формули, які можуть бути реалізовані в дослідженні за відповідним варіантом з обмеженнями.

Для складової DFD-діаграми «Умови процесів експлуатації транспортних засобів і систем моніторингу (A_2)» функціонування інформаційної системи оцінювання і забезпечення отримання параметрів технічного стану ТЗ на основі моніторингу їх експлуатації маємо в залежності від особливостей формульного (1) виразу в роботі [1] наступну залежність:

$$\begin{cases} V_{A2(1)} = f(B_2 + B_4 + B_5) \\ V_{A2(2)} = f(B_2 + B_{4(\min)} + B_5) \\ V_{A2(3)} = f(B_{1(\min)} + B_2 + B_3 + B_{4(\min)} + B_5) \\ V_{A2(4)} = f(B_1 + B_2 + B_{3(\min)} + B_4 + B_5) \\ V_{A2(5)} = f(B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \\ V_{A2(6)} = f(B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \end{cases} \quad (2)$$

де $V_{A2(1)} - V_{A2(6)}$ – функціональні залежності складових морфологічної матриці для реалізації взаємодії основних складових DFD-діаграми (інформаційної системи) з функціональними елементами розробленої морфологічної формули, відповідно до рис. 1б; $B_1 - B_5$ і $B_{i(\min)}$ – аналогічно до пояснень до формули (1).

Для складової DFD-діаграми «Засоби зберігання, аналізу і використання інформації на основі баз даних

(A_3)» функціонування інформаційної системи оцінювання і забезпечення отримання параметрів технічного стану транспортних засобів на основі моніторингу їх експлуатації маємо в залежності від особливостей формульного (1) виразу в роботі [1] наступну залежність:

$$\begin{cases} V_{A3(1)} = f(B_2 + B_4 + B_5) \\ V_{A3(2)} = f(B_2 + B_{4(\min)} + B_5) \\ V_{A3(3)} = f(B_{1(\min)} + B_2 + B_3 + B_{4(\min)} + B_5) \\ V_{A3(4)} = f(B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \\ V_{A3(5)} = f(B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \\ V_{A3(6)} = f(B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \end{cases} \quad (3)$$

де $V_{A3(1)} - V_{A3(6)}$ – функціональні залежності складових морфологічної матриці для реалізації взаємодії основних складових DFD-діаграми (інформаційної системи) з функціональними елементами розробленої морфологічної формули, відповідно до рис. 1 б; $B_1 - B_5$ і $B_{i(\min)}$ – аналогічно до пояснень до формули (1).

Для складової DFD-діаграми «Апаратне забезпечення інформаційних систем моніторингу в інфраструктурному середовищі (A_4)» функціонування інформаційної системи оцінювання і забезпечення отримання параметрів технічного стану транспортних засобів на основі моніторингу їх експлуатації маємо в залежності від особливостей формульного (1) виразу в роботі [1] наступну залежність:

$$\begin{cases} V_{A4(1)} = f(B_2 + B_4 + B_5) \\ V_{A4(2)} = f(B_2 + B_{4(\min)} + B_5) \\ V_{A4(3)} = f(B_{1(\min)} + B_2 + B_3 + B_{4(\min)} + B_5) \\ V_{A4(4)} = f(B_1 + B_2 + B_{3(\min)} + B_4 + B_5) \\ V_{A4(5)} = f(B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \\ V_{A4(6)} = f(B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \end{cases} \quad (4)$$

де $V_{A4(1)} - V_{A4(6)}$ – функціональні залежності складових морфологічної матриці для реалізації взаємодії основних складових DFD-діаграми (інформаційної системи) з функціональними елементами розробленої морфологічної формули, відповідно до рис. 1 б; $B_1 - B_5$ і $B_{i(\min)}$ – аналогічно до пояснень до формули (1).

Тепер зупинимось на доцільності використання апаратного забезпечення у відповідності до застосованих з переліку розглянутих засобів у табл 1.

Таблиця 1

Зв'язок основних складових DFD-діаграми з функціональними елементами розробленої морфологічної формули, відповідно до формули (1) [1]

Апаратні засоби моніторингу	Зв'язок основних складових DFD-діаграми (інформаційної системи) з функціональними елементами узагальненої морфологічної формули			
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
ELM 327	2 (+) + 1 (min)	3 (+)	3 (+)	3 (+)
Launch	2 (+) + 1 (min)	2 (+) + 1 (min)	2 (+) + 1 (min)	2 (+) + 1 (min)
Ruptela	3 (+) + 2 (min)	3 (+) + 2 (min)	3 (+) + 2 (min)	3 (+) + 2 (min)
Тахограф VDO DTCO 3.0 1381	4 (+) + 1 (min)	4 (+) + 1 (min)	5 (+)	4 (+) + 1 (min)
«ХНАДУ ТЕСА»	4 (+)	4 (+)	4(+)	5 (+)
«CMV»	5 (+)	5 (+)	5 (+)	5 (+)

Приклади практичної реалізації дослідження функціональних можливостей існуючих систем моніторингу процесів експлуатації ТЗ. На рис. 2 показані окремі варіанти інформаційно-комунікаційного обладнання для моніторингу діагностування, що використовувалось для проведення дослідження в частині методів отримання і обробки інформації та способів реалізації підходів до формування структури апаратного забезпечення ICM процесів експлуатації ТЗ в межах функціонування досліджуваної системи «Транспортний Засіб – Інфраструктура».



а)



б)

Рис. 2 – Елементи апаратного забезпечення моніторингу і діагностування ТЗ: а – зовнішній вигляд діагностичного приладу Launch в ТЗ; б – зовнішній вигляд діагностичного приладу Трекер Ruptela (Ruptela FM-Tco4 HCV / HCV 3G)

Показані різні види апаратного забезпечення моніторингу і діагностування ТЗ. На рис. 2а показаний зовнішній вигляд діагностичного приладу Launch при встановленні в ТЗ і на рис. 2б – зовнішній вигляд діагностичного приладу Трекер Ruptela (Ruptela FM-Tco4 HCV / HCV 3G) перед встановленням на ТЗ.

На рис. 3 показані робочі графіки зміни параметрів ТЗ в результаті проведення моніторингу параметрів стану і діагностування на окремих досліджуваних режимах.

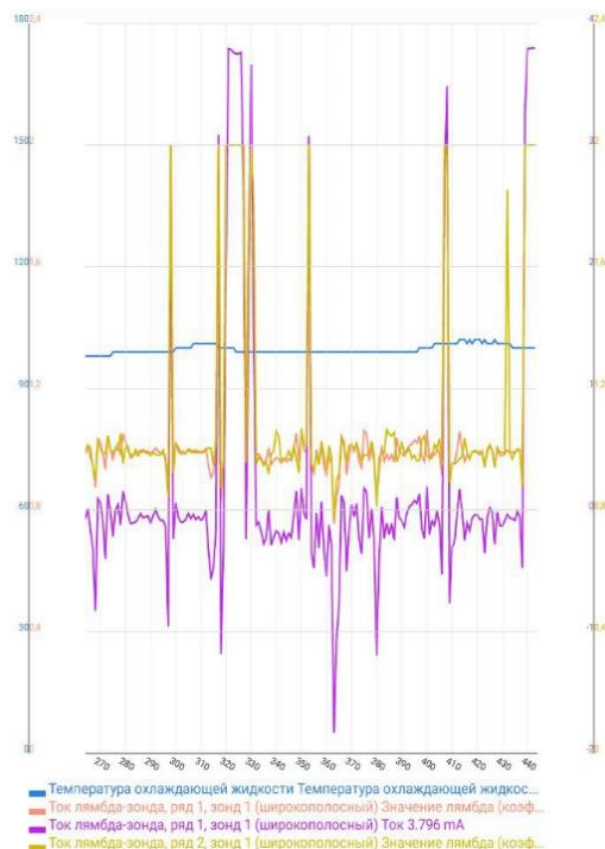


Рис. 3 – Робочі графіки зміни параметрів ТЗ на основі проведення моніторингу і діагностування

На рис. 4 показано стартове вікно системи дистанційного контролю та прогнозування технічного стану ТЗ і стану операторів «CMV», яка є найбільш повною серед проаналізованих систем для виконання поставлених задач. Саме вона охоплює всі функціональні елементи інформаційної моделі і дає можливості для розвитку системи, як у базових, так і у варійованих компонентах морфологічної формули.

Рис. 4 – Стартове вікно системи дистанційного контролю та прогнозування технічного стану ТЗ і стану операторів «CMV»

Результати та їх обговорення

На основі порівняльного аналізу визначено доцільні умови застосування розглянутих систем. Досліджені системи моніторингу ELM 327, Launch, Ruptela, тахограф – мають достатньо обмежені можливості для забезпечення реалізації моніторингу в широкому спектрі задач у відповідності до положень морфологічної формули. ELM 327 обмежена за функціональністю системи, у якій більшість функціональних елементів реалізовано частково; недостатньо розвиненими є елементи моніторингу операторів, об'єктів перевезення та взаємодії з інфраструктурою. Launch має обмежене охоплення функцій, переважно орієнтоване на технічну діагностику; перспективним є розвиток п'ятого функціонального елемента, пов'язаного з прогнозуванням технічного стану. Ruptela частково реалізує базові можливості моніторингу технічного стану й позиціонування, але не забезпечує повної інтеграції з підсистемами моніторингу операторів і аналітики даних. Тахограф виконує вузькоспеціалізовані функції контролю режимів роботи водіїв, однак не охоплює більшість інших елементів комплексної системи моніторингу.

Досліджені системи моніторингу «ХНАДУ ТЕСА» і «CMV» мають достатньо широкі можливості для забезпечення реалізації моніторингу в широкому спектрі задач у відповідності до положень морфологічної формули. Система «ХНАДУ ТЕСА» забезпечує високий рівень функціональної повноти, реалізуючи більшість елементів узагальненої моделі, за винятком блоку моніторингу операторів, який реалізований частково. Система «CMV» – є найбільш повною серед проаналізованих; охоплює всі функціональні елементи моделі як у базових, так і у варійованих компонентах.

Висновки

1. В ході дослідження виконано аналіз і синтез функціональних можливостей інформаційної системи оцінювання і забезпечення отримання параметрів технічного стану ТЗ на основі моніторингу їх експлуатації.

2. Сформовано DFD-діаграму функціонування інформаційної системи оцінювання і забезпечення отримання параметрів технічного стану ТЗ на основі моніторингу їх експлуатації. Розроблений і показаний варіант забезпечення зв'язку основних складових DFD-діаграми (інформаційної системи) з функціональними елементами узагальненої морфологічної формули. Для всіх п'яти основних функціональних компонентів, а саме: засоби моніторингу операторів; засоби моніторингу технічного стану ТЗ використовує вбудовані та зовнішні системи для оцінки роботи двигуна, трансмісії, ходової частини та механізмів курування; засоби моніторингу об'єктів перевезень; засоби моніторингу взаємодії з інфраструктурою; засоби аналізу і використання інформації споживачем, розроблені варіанти системної взаємодії зі складовими розробленої DFD-діаграми. Це дозволяє забезпечити відображення окремих варіантів запропоновані реалізації у відповідності до морфологічних ознак цих функціональних елементів. Такий підхід дає можливість сформулювати і оцінити доцільність і значущість численної кількості дійсних комбінацій конфігурацій системи. В роботі проаналізовані варіанти конфігурацій для задоволення конкретних потреб в встановлених експлуатаційних умовах.

3. Виконано оцінку доцільності використання основних складових діаграми інформаційної системи з функціональними елементами узагальненої морфологічної формули. Оцінено застосування окремих компонентів і систем моніторингу ТЗ для виконання задач дослідження шляхом застосування складових морфологічної матриці: сканер-адаптер ELM 327, діагностичний прилад Launch, трекер Ruptela (Ruptela FM-Tco4 HCV / HCV 3G), тахограф, система дистанційного контролю та прогнозування технічного стану автомобіля «ХНАДУ ТЕСА» і система дистанційного контролю та прогнозування технічного стану ТЗ і стану операторів «CMV».

4. На основі аналізу переваг та недоліків оцінювання доцільності використання апаратного

забезпечення у відповідності до застосованих з переліку розглянутих апаратних засобів було встановлено, що з досліджених і проаналізованих засобів тільки системи моніторингу «ХНАДУ ТЕСА» і «СМV» мають достатньо широкі можливості для забезпечення реалізації моніторингу в широкому спектрі задач у відповідності до положень морфологічної формули. Система «СМV» є найбільш повною серед проаналізованих ІСМ, так як охоплює всі функціональні елементи моделі у базових і у варійованих компонентах.

5. Напрямом подальших досліджень є розробка алгоритму(ів) забезпечення інтеграції інформаційних компонентів систем моніторингу на основі систематизації апаратних схем і їх практична взаємодія та координація функціонування.

Перелік використаних джерел

- [1] Матейчик В., Навроцький А. Систематизація схем апаратного забезпечення систем моніторингу експлуатації транспортних засобів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 48. С. 184-192. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310711>.
- [2] Особливості дистанційної ідентифікації режимів праці та відпочинку водія в системі інформаційного моніторингу транспортних засобів / І. В. Худяков та ін. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології*. 2020. Вип. 35. С. 146-155. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-15>.
- [3] Особливості моніторингу і визначення статусу несправностей транспортного засобу у складі бортового інформаційно-діагностичного комплексу / Волков В. П., Грицук І. В., Комов А. П., Волков Ю. В. *Вісник Національного транспортного університету*. 2014. Вип. 30. С. 51-62.
- [4] Організація технічної експлуатації автомобілів в умовах формування інтелектуальних транспортних систем / В.П. Волков та ін. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Автомобіле- та тракторобудування*. 2013. № 29. С. 138-144.
- [5] Особливості дистанційної ідентифікації режимів роботи водія в інформаційній системі моніторингу транспортного засобу / Грицук І. В., Матейчик В. П., Симоненко Р. В., Худяков І. В. *Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr.19. Seria: Transport. Rzeszow*, 2019. С. 7-15.
- [6] Інтелектуальні системи моніторингу транспорту: монографія / В. П. Волков та ін. Харків: Вид-во НТМТ, 2015. 246 с.
- [7] Information Security Risk Management of Vehicles / D. Klets et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-0015. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>.
- [8] Організація та логістика перевезень: підручник / Ізтелеуова М. С., Грицук І. В., Арімбекова П. М., Тарандушка Л. А. Херсон: ОЛДІ, 2021. 264 с.
- [9] Худяков І. В. Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів. *Наукові нотатки*. 2019. Вип. 67. С. 141-148.
- [10] The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1773. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
- [11] Черняк Ю. В., Прилепський Ю. В., Грицук І. В. Фізична модель рекуперативної системи маневрового тепловозу: Монографія. Донецьк: ДонІЗТ, 2010. 196 с.
- [12] Assessment of Operation Speed and Precision of Electropneumatic Actuator of Mechanical Transmission Clutch Control System / M. Mikhalevich et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1295. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1295>.
- [13] Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2019. Article 2019-01-0906. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0906>.
- [14] Особливості розробки моделі бази даних інформаційної системи моніторингу транспортного засобу, оснащеного тахографом і трекером / І. В. Грицук та ін. *Сучасні технології на автомобільному транспорті та машинобудуванні: наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, 15-18 жовтня 2019 р.* С. 87-90.
- [15] Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel / A. Golovan et al. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019. Pp. 390-393. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896595>.
- [16] The Choice of a Rational Type of Fuel for Technological Vehicles / V. Zaharchuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1759. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1759>.
- [17] Increase of Stability for Motor Cars in Service Braking / M. Podrigalo et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1880. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1880>.
- [18] Arciszewski T. Morphological Analysis in Inventive Engineering. *Technological Forecasting and Social Change*. 2018. Vol. 126. Pp. 92-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.10.013>.
- [19] Ritchey T. Modeling Complex Socio-Technical Systems using Morphological Analysis. URL: <https://swemorph.com/pdf/it-webart.pdf> (дата звернення: 03.07.2025).

[20] Катренко А. В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації: Навчальний посібник. Львів: Новий світ – 2000, 2003. 420 с.

[21] Тахограф цифровий VDO DTCO 3.0 1381 24V/12V. URL: <https://tahoprof.com.ua/product/tahograf-czyfrovyyj-vdo-dtco-3-0-1381-24v-12v-novyj/> (дата звернення: 10.08.2025).

FEATURES OF INTERACTION BETWEEN DATA ACQUISITION AND PROCESSING TOOLS IN THE HARDWARE STRUCTURE OF VEHICLE OPERATION MONITORING INFORMATION SYSTEMS

Mateichyk V.P. D.Sc. (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3683-7246>, e-mail: wmate@ukr.net;
Navrotskyi A.V. postgraduate student, National Transport University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0188-4630>, e-mail: andrewnav888@gmail.com

The paper explores the interaction features of data acquisition and processing tools within the hardware architecture of information systems designed for vehicle operation monitoring. It is established that the performance efficiency of modern vehicles largely depends on the degree of integration among control devices, diagnostic subsystems, and data transmission technologies within a unified hardware–information framework. A review of recent studies in the field of vehicle condition monitoring systems has been conducted, outlining scientific and technical prerequisites for improving data collection, processing, and interpretation procedures. A morphological analysis–based approach to the classification and organization of hardware elements is proposed, enabling the formation of optimal configurations of monitoring system components while accounting for functional interrelations between subsystems. A generalized model describing the interaction between technical and informational means has been developed, considering the influence of external operating conditions and ensuring greater reliability in monitoring vehicle technical parameters. A data flow diagram (DFD) representing the operation of the information system for assessing and obtaining vehicle technical condition parameters based on operational monitoring has been created. The study presents a method of linking the core elements of this diagram with the functional components defined by the developed morphological structure. Several configuration options have been analyzed to address specific operational requirements under given conditions. The feasibility of applying the main elements of the system diagram in conjunction with the morphological model components has been evaluated. The results of the study can be applied in the design, modernization, and optimization of vehicle monitoring information systems for various transport applications. The practical implementation of the proposed approaches will enhance operational efficiency, reduce maintenance costs, and improve overall transport safety.

Keywords: vehicle, information system, monitoring systems, hardware, data acquisition and processing, morphological analysis, technical condition.

References

- [1] V.P. Mateichyk, and A.V. Navrotskyi, “Systematyzatsiia skhem aparatnoho zabezpechennia system monitorynhu ekspluatatsii transportnykh zasobiv” [“Systematization of hardware schemes of vehicle operation monitoring systems”], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovsky State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 48, pp. 184-192, 2024. doi: **10.31498/2225-6733.48.2024.310711**. (Ukr.)
- [2] I. Khudiakov et al., “Osoblyvosti dystantsiinoi identyfikatsii rezhymiv pratsi ta vidpochynku vodiia v systemi informatsiinoho monitorynhu transportnykh zasobiv” [“Peculiarities of remote identification of labor mode and rest of a driver in the vehicle information monitoring system”], *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. Seriia: Transportni systemy i tekhnolohii – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies, series «Transport systems and technologies»*, vol. 35, pp. 146-155, 2020. doi: **10.32703/2617-9040-2020-35-15**. (Ukr.)
- [3] V.P. Volkov, I.V. Gritsuk, A.P. Komov, and Ju.V. Volkov, “Osoblyvosti monitorynhu i vyznachennia statusu nespravnosti transportnoho zasobu u skladi bortovoho informatsiino-diahnostychnoho kompleksu” [“Features of the monitoring and malfunctions status determination of the vehicle on-board diagnostic information complex”], *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University*, vol. 30, pp. 51-62, 2014. (Ukr.)
- [4] V.P. Volkov, V.P. Mateichyk, P.B. Komov, O.B. Komov, and I. V. Gritsuk, “Orhanizatsiia tekhnichnoi ekspluatatsii avtomobiliv v umovakh formuvannia intelektualnykh transportnykh system” [“Organization of technical operation of vehicles in the context of the formation of intelligent transport systems”], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI*.

Seriia: Avtomobile- ta traktorobuduvannia – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Automobile and Tractor Construction, № 29, pp. 138-144, 2013. (Ukr.)

- [5] I.V. Gritsuk, V.P. Mateichyk, R.V. Symonenko, I.V. Khudiakov, “Osoblyvosti dystantsiinoi identyfikatsii rezhyimiv roboty vodiia v informatsiinii systemi monitorynhu transportnoho zasobu” [“Features of remote identification of driver operating modes in the vehicle monitoring information system”], in *Systemy i shrodky transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr.19. Seria: Transport, Rzeszow, pp. 7-15, 2019. (Ukr.)*
- [6] V.P. Volkov et al., *Intelektualni systemy monitorynhu transportu: monohrafiia* [Intelligent transport monitoring systems: monograph], Kharkiv, Ukraine: NTMT Publ., 2015. (Ukr.)
- [7] D. Klets et al., “Information Security Risk Management of Vehicles,” *SAE Technical Paper*, article 2018-01-0015, 2018. **doi: 10.4271/2018-01-0015.**
- [8] M.S. Izteleuova, I.V. Gritsuk, P.M. Arimbekova, and L.A. Tarandushka, *Orhanizatsiia ta lohistyka perevezhen: pidruchnyk* [Transportation Organization and Logistics: Textbook]. Kherson, Ukraine: OLDI Publ., 2021. (Ukr.)
- [9] I.V. Khudiakov, “Modeli bazy danykh informatsiinoi systemy monitorynhu parametriv tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv” [“Monitoring information system data base models vehicle technical parameters”], *Naukovi Notatki*, vol. 67, pp. 141-148, 2019. (Ukr.)
- [10] I. Gritsuk et al., “The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units,” *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1773, 2018. **doi: 10.4271/2018-01-1773.**
- [11] Yu.V. Cherniak, Yu.V. Prylepskyi, and I.V. Gritsuk, *Fizychna model rekuperatyvnoi systemy manevrovoho teplovozu: Monohrafiia* [Physical model of the regenerative system of a shunting locomotive: Monograph]. Donetsk, Ukraine: DonIZT Publ., 2010. (Ukr.)
- [12] M. Mikhalevich et al., “Assessment of Operation Speed and Precision of Electropneumatic Actuator of Mechanical Transmission Clutch Control System,” *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1295, 2018. **doi: 10.4271/2018-01-1295.**
- [13] I. Gritsuk et al., “Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators,” *SAE Technical Paper*, article 2019-01-0906, 2019. **doi: 10.4271/2019-01-0906.**
- [14] I.V. Hrytsuk, R.V. Symonenko, I.V. Khudiakov, V.S. Manzhelai, D.S. Pohorletsykyi, and V.V. Chernenko, “Osoblyvosti rozrobky modeli bazy danykh informatsiinoi systemy monitorynhu transportnoho zasobu, osnashchenoho takhohrafom i trekerom” [“Features of developing a database model for an information system for monitoring a vehicle equipped with a tachograph and a tracker”], in *Proc. of the Int. Sci.-Pract. Conf. «Modern technologies in road transport and mechanical engineering»*, Kharkiv, Ukraine, Oct. 15-18, 2019, pp. 87-90. (Ukr.)
- [15] A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov, and O. Shumylo, “Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel,” in *Proc. of the IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, Sept. 23-25, 2019, pp. 390-393. **doi: 10.1109/MEES.2019.8896595.**
- [16] V. Zaharchuk et al., “The Choice of a Rational Type of Fuel for Technological Vehicles,” *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1759, 2018. **doi: 10.4271/2018-01-1759.**
- [17] M. Podrigalo et al., “Increase of Stability for Motor Cars in Service Braking,” *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1880, 2018. **doi: 10.4271/2018-01-1880.**
- [18] T. Arciszewski, “Morphological Analysis in Inventive Engineering,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 126, pp. 92-11, 2018. **doi: 10.1016/j.techfore.2017.10.013.**
- [19] T. Ritchey, “Modeling Complex Socio-Technical Systems using Morphological Analysis”. [Online]. Available: <https://swemorph.com/pdf/it-webart.pdf>. Accessed on: July 03, 2025.
- [20] A.V. Katrenko, *Systemnyi analiz obiektiv ta protsesiv kompiuteryzatsii: Navchalnyi posibnyk* [Systems analysis of computerization objects and processes: Tutorial]. Lviv, Ukraine: Novyi svit – 2000 Publ., 2003. (Ukr.)
- [21] Takhohraf tsyfrovyy VDO DTCO 3.0 1381 24V/12V (Digital tachograph VDO DTCO 3.0 1381 24V/12V). [Online]. Available: <https://tahoprof.com.ua/product/tahograf-cyfrovyy-vdo-dtco-3-0-1381-24v-12v-novyj/>. Accessed on: August 10, 2025. (Ukr.)

Стаття надійшла 21.08.2025

Стаття прийнята 19.09.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Матейчик В. П., Навроцький А. В. Особливості взаємодії засобів збирання і обробки інформації в структурі апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації транспортних засобів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 51. С. 311-320. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344984>.

ВІДНОВЛЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ГІДРАВЛІЧНИХ НАСОСІВ
ТИПУ «НШ» ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Бурлака О.А.	канд. техн. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2296-7234 , e-mail: oleksii.burlaka@pdau.edu.ua ;
Келемеш А.О.	канд. техн. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9429-8570 , e-mail: anton.kelemesh@pdau.edu.ua ;
Ляшенко С.В.	канд. техн. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3227-3738 , e-mail: sergii.liashenko@pdau.edu.ua ;
Гончаренко О.О.	канд. техн. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4325-2705 , e-mail: oleksandr.honcharenko@pdau.edu.ua

В даній статті розглянуто результати наукового дослідження щодо доцільності застосування пластичного вібраційного деформування робочих поверхонь бронзових втулок підшипників ковзання гідравлічних шестеренних насосів типу «НШ». Такі гідравлічні насоси набули широкого вжитку в сучасному автомобіле- та тракторобудуванні. В конструкціях гідравлічних шестеренних насосів спостерігається тенденція до збільшення використання в якості конструкційних матеріалів кольорових металів та багатокомпонентних сплавів на основі таких металів. Мета дослідження розглядається як пошук оптимальних режимів технологічних процесів пластичного вібраційного зміцнення робочої поверхні бронзових втулок підшипників ковзання валів гідравлічних шестеренних насосів типу «НШ» очікуваними результатами при цьому є підвищення терміну використання та експлуатаційної надійності зміцнених робочих поверхонь бронзових втулок. Предметом нашого дослідження стали бронзові втулки підшипників ковзання шестеренних валів гідравлічних насосів НШ-32 та НШ-100. Матеріал втулок – бронза CuSn5Zn5Pb5. Експериментальні дослідження щодо обробки робочих поверхонь бронзових втулок підшипників ковзання шестеренних валів гідравлічних насосів було проведено з використанням спеціальних пуансонів, що виготовлені з урахуванням геометричних розмірів бронзових втулок. Матеріал пуансонів – інструментальна сталь У7. Актуальними елементами пропонованої технології виготовлення експериментальних пуансонів є отримання за рахунок конструкційного матеріалу та термічної обробки твердості робочих поверхонь в межах 55-58 HRC. Основні складові експериментальних досліджень спрямовані на вивчення закономірностей впливу пластичної вібраційної деформації на поверхні тертя бронзових втулок гідравлічних шестеренних насосів. Вібраційне пластичне деформування робочого поверхневого шару бронзи розглядається як один з вагомих елементів, що можливо використовувати при здійсненні відновлення бронзових втулок чи виготовленні нових таких втулок для підшипників ковзання шестеренних гідравлічних насосів. Оптимальним кутом робочих конусних поверхонь сталевих пуансонів за вимогою мінімізації маси зсунутої з робочої поверхні втулки бронзи при пластичному вібраційному деформуванні став кут $\beta = 9^\circ$. Отримані результати можуть бути використані для здійснення пластичного вібраційного зміцнення інших бронзових деталей гідравлічних насосів / моторів, наприклад, аксіально-плунжерних чи радіально-плунжерних насосів / моторів гідростатичної трансмісії.

Ключові слова: гідравлічний насос, бронзова втулка, вібраційне деформування, пластичність, зношування, зносостійкість, відновлення, пластична деформація.

Постановка проблеми

Наукові та виробничі завдання, спрямовані на підвищення надійності та довговічності роботи вузлів та агрегатів гідравлічних систем та обладнання сучасних автомобілів та тракторів, не втрачають своєї актуальності в умовах сьогодення. Реалізацію таких завдань можливо розглядати і як підвищення продуктивності гідроприводу, зменшення металоемності його складових частин і компонентів. Тому пошук способів підвищення експлуатаційних характеристик гідравлічних насосів шестеренного типу, експериментальна складова досліджень з такого питання і, наприкінці, можливість виробничого впровадження пропонованих інноваційних елементів технологій ремонту гідрообладнання не втрачають своєї актуальності.

Враховуючи технічну складність та енергонасиченість гідравлічних систем автомобільного транспорту, тракторів, сільськогосподарських машин, іншого спеціалізованого гідрофікованого обладнання, маємо постійне здорожчання виробництва і ремонту гідроапаратури [1].

Технічні рішення сьогодення, щодо автомобіле- та тракторобудування, спрямовані за збільшення використання в якості конструкційних матеріалів кольорових металів та багатокомпонентних сплавів на основі таких металів. Спостерігається і поширюється з кожним роком використання і композитних матеріалів.

Складові елементи гідроприводу автотракторного призначення можуть піддаватись доволі значним статичним та динамічним знакозмінним навантаженням. При цьому, як приклад вузли – підшипники

ковзання як спряження «вал-втулка» працюють на значних лінійних та кутових швидкостях. В такому випадку виникають інженерні завдання щодо протидії тертю ковзання, протидії впливу високих температур на технологічні рідини гідравлічних приводів [2].

Тому обраний напрямок дослідження пов'язаний з удосконаленням технологій як виготовлення, так і відновлення бронзових деталей пар тертя в гідравлічних насосах для підвищення надійності та довговічності їхнього використання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На практиці досить поширеним є технології застосування вібраційного коливального зміцнення робочих поверхонь металевих деталей та сплавів з метою покращення їхніх механічних характеристик, в тому числі твердості та зносостійкості. Доведено, що використання вібрації для відновлення частково зношених та виготовлення нових деталей типу «втулка» з використанням вібраційних коливань та пластичної деформації як інноваційних елементів технологічних операцій по відновленню просторової геометрії та антифрикційних властивостей визначає низку суттєвих переваг відносно традиційних механічних методів обробки таких деталей, наприклад – за допомогою точіння на металообробних верстатах.

Значна частина результатів експериментальних досліджень щодо визначення позитивних складових ущільненого за допомогою пластичної деформації сплаву бронзи CuSn7Zn4Pb7 наведено в роботі [1]; в такому випадку вивчались наслідки пластичного деформування на міцність при розтязі, крученні, втомну довговічність; представлено різні варіації силових навантажень на елементи об'єкту та предмет дослідження; проведено порівняльні дослідження щодо відповідності зміцненої поверхні стандартам, в яких висвітлено технічні та технологічні вимоги до таких конструкційних матеріалів.

Щодо нашої методики частини експериментального дослідження, то діапазон і границя крайніх значень досліджуваних факторів повинна не перевищувати межу плинності та руйнування бронзового сплаву, з якого виготовляються втулки для підшипників ковзання гідравлічних шестеренних насосів.

Частина наукових досліджень [2] описана і спрямована на покращення антифрикційних властивостей бронзової поверхні тертя шляхом додаткового попереднього збагачення вуглецем та нанесення м'якого антифрикційного шару. Але в такому випадку виникають деякі ускладнення при роботі пари тертя «вал-втулка» в режимі високих температур та швидкостей.

Щодо напрямку застосування «внутрішньогранулярного ультрананоосадження» [3], то в такому випадку кінцевою очікуваною метою є підсилена пластифікація та зміцнення за допомогою сплавів Cu на основі полікристалічних структур. Автори [3] на основі власних досліджень прийшли до висновку, що

використання внутрішньогранулярної дисперсії ультрананочастинок призводить до збільшення пластичності бронзового олов'янистого сплаву – приблизно у 2 рази та до 20% збільшується міцність такого сплаву.

Напрямок технологій покращення бронзового сплаву C83600 Tin Bronze з використанням термічної обробки під час деформації робочих поверхонь деталей описано в науковій праці [4]. Краща передбачуваність спостерігається при цьому в отриманому механізмі гарячого деформування моделі «Арреніуса» з використанням олов'яної бронзи C83600. Основні результати дослідження викладені у вигляді кривих напруження-деформація сплаву C83600 Tin Bronze за результатами ізотермічного випробування стисканням зі значним температурним діапазоном: 873-1073 K та швидкістю деформації в межах $0,001-1 \text{ c}^{-1}$ [4]; при цьому значним здобутком є рівняння, що описують закономірності та тенденції високотермічного напруження текучості досліджуваного сплаву.

Відповідно, закономірності та тенденції пластичної деформації бронзи та подібних сплавів на основі міді, що мають покращені антифрикційні властивості, під дією різних механічних та термічних навантажень є науковою проблемою, актуальність якої з часом тільки підсилюється. Інноваційним напрямком при цьому може бути напрямок, що використовує методичні та методологічні складові, де ступінь пластичної деформації бронзи отримується за допомогою вібраційної обробки тиском. Напрямок також можливо поширювати і шляхом удосконалення технологічного інструменту для здійснення такого вібраційного пластичного зміцнення поверхонь тертя бронзових сплавів, наприклад, як у нашому випадку – зміцнення нових та ремонтних бронзових втулок підшипників ковзання валів гідравлічних шестеренних насосів типу «НШ».

Щодо фізичних процесів по застосуванню вібрації для оброблення поверхонь бронзових деталей, то основою останніх є використання гармонійних вібраційних коливань підсистеми «оброблювана бронзова поверхня – технологічний інструмент» [5].

Науковцями в працях [6, 7] досліджено основні тенденції щодо впливу описаних віброударних навантажень на збільшення величини опору втомі металів після такого впливу; при цьому пропонується збільшувати ступінь вібраційного зміцнення шляхом застосування системи відцентрових сил при вібраційному зміцненні робочих поверхонь матеріалів.

Щодо економічної та технологічної доцільності виробничого упровадження технологій зміцнення робочих поверхонь металів та сплавів з використанням вібраційної обробки тиском, то такі судження містять праці [7, 8]; автори наводять приклади зменшення витрат матеріальних та використання трудових ресурсів під час здійснення ремонтного виробництва.

Науковцями у працях [9, 10] доведено, що величина вібраційного навантаження при обробці робочих поверхонь тиском може бути збільшена за умови збільшення кількісних значень таких показників

амплітуди та частоти коливань технологічного інструменту, але даний науковий напрямок має значний потенціал для проведення подальших досліджень і випробувань.

Встановлено безпосередній кореляційний зв'язок між ступенем зносостійкості та антифрикційними властивостями обробленого пластичними вібраційним деформуванням поверхневого шару деталі та глибиною такої обробки, але у працях [11, 12] вказано на відсутність конкретних технологічних рекомендацій досліджуваних процесів.

Як альтернативним способом пластичного зміцнення робочих поверхонь бронзових деталей гідроапаратури може бути використання дробоструменевої обробки [13], цей спосіб має практичну цінність, особливо при зміцненні поверхонь складної конфігурації, але являється доволі складним з технічної точки зору.

Останні твердження доводять наукову та практичну необхідність виконання розширеного дослідження даного напрямку щодо застосування як у ремонтному виробництві, так і машинобудуванні технологій вібраційного пластичного зміцнення поверхневого робочого шару бронзових деталей типу втулка, в тому числі і для покращення якості роботи підшипників ковзання гідралічних шестеренних насосів типу «НШ».

Мета статті

Мета дослідження розглядається як пошук оптимальних режимів технологічних процесів пластичного вібраційного зміцнення робочої поверхні бронзових втулок підшипників ковзання валів гідралічних шестеренних насосів типу «НШ»; очікуваними результатами при цьому є підвищення терміну використання та експлуатаційної надійності зміцнених робочих поверхонь бронзових втулок.

Досягнення поставленої мети очікується за рахунок вирішення наступних задач наукового дослідження:

- здійснити технологічне обґрунтування оптимальних параметрів процесу обробки тиском робочої поверхні бронзових втулок валів гідралічних шестеренних насосів типу «НШ»;
- провести порівняння технічних та технологічних показників і характеристик оброблених пластичним вібраційним деформуванням бронзових втулок валів гідралічних шестеренних насосів як відновлених, так і нових з втулками, виготовленими за звичайними технологіями.

Матеріали та методи

В нашому випадку предметом дослідження обрано бронзові втулки підшипників ковзання гідралічних шестеренних насосів типу «НШ». До речі, щодо спектру застосування досліджених технологій відновлення бронзових втулок тертя, то такі методики і пропозиції можливо використовувати і в інших аналогічних вузлах тертя ковзання, наприклад – підшипники

розподільчих валів механізмів газорозподілу та підшипники ковзання в турбонаддувах систем повітрябезпечення двигуна внутрішнього згоряння.

Сучасні гідралічні насоси типу «НШ», четвертого виконання корпусу по тиску, можуть працювати при максимальному піковому тиску технологічних мастил до 25 МПа, робоча температура рідини в гідроприводах при цьому досягає 80°C і вище, частота обертання шестеренних валів гідронасосів, як правило 1000-3600 хв⁻¹. Підвищення температури рідини у сукупності зі збільшенням швидкості обертання валів насосів призводить не тільки до збільшення продуктивності, але й до погіршення умов мащення спряження «бронзова втулка – шестеренний вал» підшипників ковзання, як наслідок – прискорений знос такого спряження.

В контексті описаного нами було здійснено експериментальні дослідження та перевірку оновлених за допомогою пластичного вібраційного деформування механічних властивостей поверхонь тертя бронзових втулок підшипників ковзання гідралічних шестеренних насосів типу «НШ» на прикладі НШ-32 та НШ-100. В даній публікації обґрунтовується доцільність виробничого впровадження технології вібраційного пластичного зміцнення поверхні тертя бронзових деталей для основної частини модельного ряду підшипників ковзання гідралічних насосів.

Виклад основного матеріалу

Щодо предмету нашого дослідження, то ним стали бронзові втулки підшипників ковзання шестеренних валів гідралічних насосів НШ-32 (рис. 1) та НШ-100 (рис. 2). Матеріал втулок – бронза CuSn5Zn5Pb5.

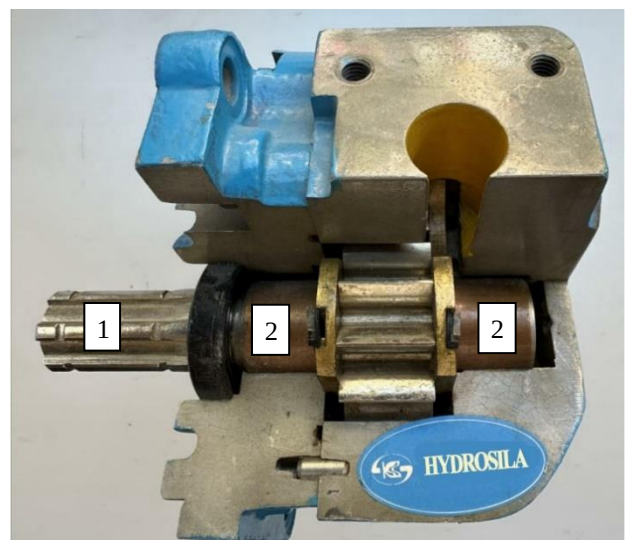


Рис. 1 – Досліджувані зразки бронзових втулок у розрізі гідралічного шестеренного насоса типу НШ-32:

1 – привідний вал насоса НШ-32; бронзові втулки

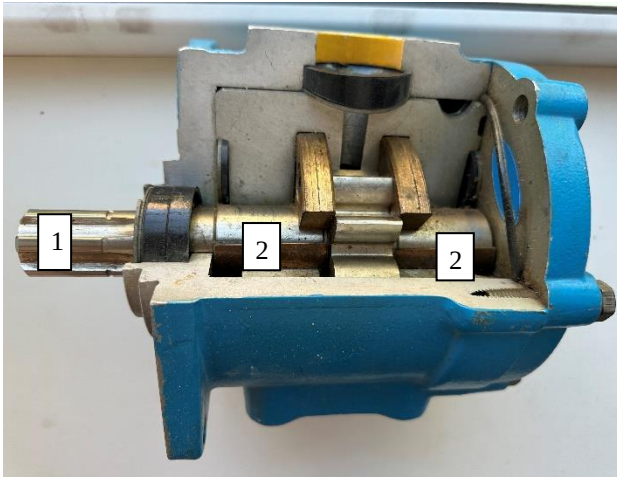


Рис. 2 – Досліджувані зразки бронзових втулок у розрізі гідравлічного шестеренного насоса типу НШ-100:
1 – привідний вал; 2 – бронзові втулки

Під час використання таких та подібних гідравлічних шестеренних насосів в sprzęженні підшипників ковзання шестеренних валів відбувається абразивний знос (рис. 3). Відомо, що інтенсивність та неоднорідність такого зносу залежить від якості оливи в гідравлічних системах та наявності домішок у оливі з абразивною природою.

Відновлення sprzęження «бронзова втулка – шестеренний вал» гідравлічного насоса може бути виконане як шліфуванням частини валу з виготовленням ремонтної бронзової втулки, так і виготовленням нової бронзової втулки номінального розміру при відновленні робочої поверхні шестеренного валу до номінальних параметрів шляхом напilenня чи наплавлення з подальшим шліфуванням.

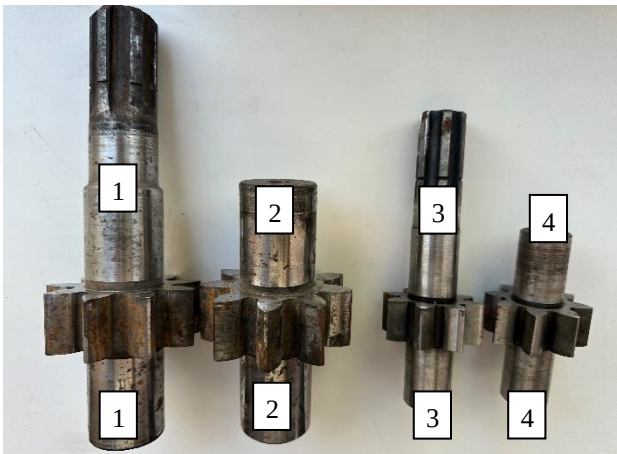


Рис. 3 – Сліди зношування поверхонь тертя ковзання на ва-лах гідравлічних насосів типу НШ-100 (праворуч) та НШ-32 (ліворуч): 1 – сліди зносу привідного валу НШ-100; 2 – сліди зносу веденого валу НШ-100; 3 – сліди зносу привідного валу НШ-32; 4 – сліди зносу веденого валу

Експериментальні дослідження щодо обробки робочих поверхонь бронзових втулок підшипників ковзання шестеренних валів гідравлічних насосів було проведено з використанням спеціальних пуансонів, що виготовлені з урахуванням геометричних розмірів бронзових втулок. Приклад одного з пуансонів показано на рис. 4. Матеріал пуансонів – інструментальна сталь У7.



Рис. 4 – Приклад виготовленого експериментального пуансону, що було використано для обробки тиском – вібраційним пластичним деформуванням робочих поверхонь бронзових втулок підшипників ковзання шестеренних валів гідравлічних насосів

Особливістю елементів технології виготовлення таких пуансонів є використання термічної обробки – загартування, де попередньо нагрітий до температури $780\text{--}800^{\circ}\text{C}$ пуансон охолоджувався і загартовувався в оливі. Другим етапом термічної обробки пуансона було проведення термічного відпуску за температурного режиму $400\text{--}420^{\circ}\text{C}$ та часового інтервалу $15\text{--}20$ хв з подальшим охолодженням. Актуальними елементами пропонованої технології виготовлення експериментальних пуансонів є отримання за рахунок конструкційного матеріалу та термічної обробки твердості робочих поверхонь в межах 55-58 HRC, а твердість хвостовиків експериментальних пуансонів відповідно складала 40-45 HRC.

Основна робоча поверхня пуансона (рис. 4) має конічну форму. При проведенні досліджень щодо пластичного вібраційного зміцнення робочої поверхні бронзових втулок гідравлічних насосів типу НШ важливим моментом було врахування суттєвості кореляційних взаємозв'язків між зміною кута ухилу конуса робочої поверхні пуансона та отриманих міцнісних характеристик обробленої пластичним вібраційним деформуванням робочих поверхонь бронзових втулок гідравлічних шестеренних насосів.

Такий кут змінювався шляхом використання в межах $\beta = 8^{\circ}, 9^{\circ}, 10^{\circ}$.

Низку досліджень щодо пошуку оптимальних режимів при застосуванні пластичного вібраційного зміцнення робочій поверхні проведено на спеціально розробленій експериментальній установці (рис. 5, 6). Щодо основних елементів експериментальної установки для проведення досліджень по вивченню дії вібраційних коливань на якість пластичного деформування та зміцнення робочих поверхонь кінематичних пар є вібратор коливань 1, основа 2, гідропривід вібраційної частини установки 3.



Рис. 5 – Експериментальна установка щодо пошуку оптимальних режимів вібраційної пластичної деформації робочих поверхонь бронзових втулок гідравлічних шестеренних насосів (система пуансон-матриця (розріз))

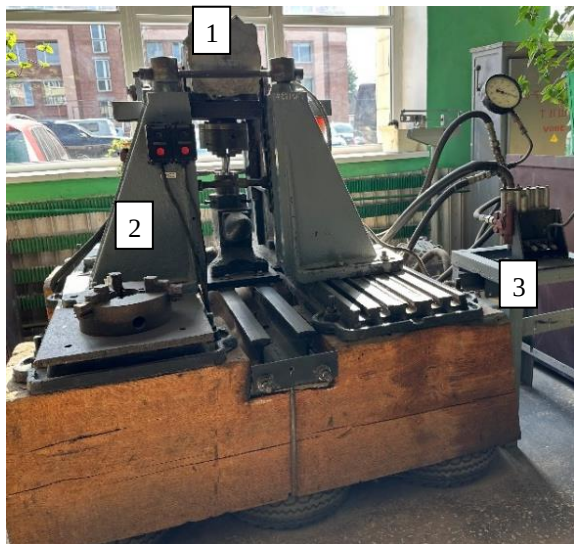


Рис. 6 – Експериментальна установка щодо пошуку оптимальних режимів вібраційної пластичної деформації робочих поверхонь бронзових втулок гідравлічних шестеренних насосів (силова вібраційно-гідравлічна система (загальний вигляд))

Використання спряження: пуансон з конічною голівкою – циліндрична матриця з набором спеціальних вставок під розміри бронзових втулок гідравлічних насосів дає можливість досліджувати та визначати оптимальні режими пластичного вібраційного зміцнення робочих поверхонь бронзових втулок з варіюванням в межах границь плану експерименту швидкістю руху вібраційного вузла, частотою коливань віброзбуджувача.

Відмінністю методики експериментального дослідження в нашому випадку є те, що досліді виконувались як із застосуванням змащувальних технологічних рідин (мінеральне мастило М10Г2), так і при сухому терті.

Методами порівняння досліджено якість робочих поверхонь бронзових втулок підшипників ковзання гідравлічних шестеренних насосів (на прикладі бронзових втулок гідравлічного насосу НШ-100).

Як описано в [12], щодо механічних та антифрикційних властивостей бронзи, то їх можливо досліджувати і за допомогою вивчення мікроструктури таких багатокомпонентних сплавів, а саме фазовим складом таких сплавів.

Методичні складові по пошуку та порівнянню механічних, антифрикційних та міцнісних характеристик бронзових втулок підшипників ковзання гідравлічних шестеренних насосів, виготовлених із застосуванням пластичного вібраційного зміцнення та звичайною технологією досліджувались на зразках таких втулок з використанням, в тому числі, металографічного мікроскопу МІМ-8М з кратністю збільшення зображення 100-400.

Порівнювали нову бронзову втулку з бронзовою втулкою, робоча поверхня якої зміцнена за допомогою пластичного вібраційного деформування. При цьому металографічні дослідження проведено на шліфах, що виготовлені зі зразків бронзових втулок вищезгаданих гідравлічних насосів.

Отже, зображення зразків мікроструктури спеціально підготовлених і протравлених азотною кислотою елементів бронзових втулок гідравлічних шестеренних насосів подано на рис. 7.

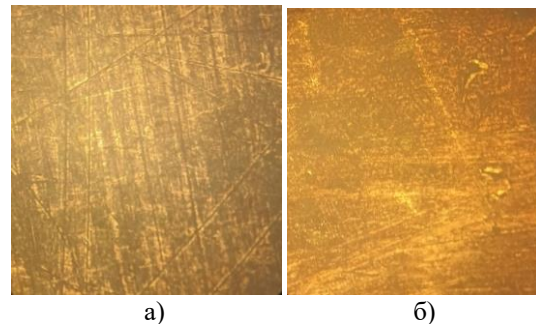


Рис. 7 – Мікроструктура зразків поверхні бронзи CuSn5Zn5Pb5 за умови збільшення $\times 100$: а – звичайне деформування; б – вібраційне деформування

За такими дослідженнями визначено: технологічна операція з обробки тиском робочої поверхні бронзових втулок гідравлічних шестеренних насосів, а саме – пластичне вібраційне зміцнення призводить до збільшення ступеня рівномірності основних компонентів мікроструктури бронзового сплаву та стає більш дрібнозернистою в порівнянні зі звичайною бронзою, обробленою точінням чи штампуванням.

Ще одним важливим домінуючим фактором щодо якості роботи спряження поверхні ковзання сталений вал – бронзова втулка гідравлічного насоса є шорсткість поверхонь тертя. В нашому випадку кількісне значення шорсткості поверхні тертя, за умови отримання останньої як механічною обробкою, так і звичайним та вібраційним деформуванням, вимірювалась з використанням профілометра моделі 296, вимірювальний параметр – Ra.

Для проведення порівняльних експериментальних досліджень відносно інтенсивності зношування

поверхонь тертя в спряженні ковзання вал – бронзова втулка гідравлічного насоса, було використано машину тертя типу МИ-1М.

Режим роботи змодельовано у відповідності до роботи досліджуваної кінематичної пари тертя у гідравлічних шестеренних насосах типу НШ: оберти ролика близько 2000 хв⁻¹, навантаження на пару тертя – 400 Н.

Проведення експериментальних порівняльних досліджень за даною методикою було здійснено мінімум з десятикратною повторюваністю. При цьому також досліджувались закономірності та взаємозв'язки між кількістю зсунутого з обробленої поверхні металу бронзової втулки гідравлічного насоса; варіацією величиною кута ухилу робочої поверхні пуансона β та заданого діапазону припуску з урахуванням можливості подальшої обробки та впливу швидкості вібраційної пластичної деформації (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльні результати експериментального дослідження на зносостійкість зразків бронзових втулок шестеренних валів гідравлічних насосів типу НШ

Пара тертя	Вид обробки	Знос колодки, г	Знос ролика, г	Середній знос колодки, г	Середній знос ролика, г
1	Нові втулки	0,0799	0,0586	0,0805	0,05746
2		0,0815	0,0574		
3		0,0803	0,0547		
4		0,0808	0,0581		
5		0,0800	0,0585		
6	Оброблені звичайним деформуванням	0,1035	0,0660	0,09978	0,06728
7		0,1006	0,0671		
8		0,0960	0,0665		
9		0,1008	0,0690		
10		0,0980	0,0678		
11	Оброблені вібраційним деформуванням	0,0872	0,0583	0,08176	0,05802
12		0,0851	0,0576		
13		0,0802	0,0589		
14		0,0807	0,0580		
15		0,0756	0,0573		

Спостерігалось збільшення маси зсунутого шару бронзи при збільшенні поступальної швидкості руху пуансона щодо вібраційної пластичної деформації поверхневого шару бронзової втулки гідравлічного шестеренного насоса. Припуск на подальшу обробку встановлено в межах 0,4 мм.

Графічне відтворення основних результатів експериментальної частини дослідження щодо визначення закономірностей впливу зміни кута конуса робочих поверхонь пуансонів на кількість зсунутої з обробленої пластичним вібраційним деформуванням бронзи містить рис. 8.

З урахуванням отриманих результатів, зазначено: оптимальним кутом робочих конусних поверхонь

сталених пуансонів за вимогою мінімізації маси зсунутої з робочої поверхні втулки бронзи при пластичному у вібраційному деформуванні став кут $\beta = 9^\circ$. Також застосування вібрації в технологіях зміцнення поверхні тертя бронзових втулок гідравлічних шестеренних насосів типу НШ дає змогу до суттєвого зменшення кількості зсунутого бронзового сплаву в порівнянні із застосуванням звичайного пластичного деформування.

Нами виявлено, що оптимальними режимами пластичного вібраційного деформування при зміцненні робочих поверхонь (поверхонь тертя) бронзових втулок шестеренних насосів є: кут нахилу конуса пуансона $\beta = 9^\circ$, припуск на подальшу обробку $\Pi = 0,4$ мм.

Порівняння величини зсунутої бронзи, обробленої вібраційним та звичайним пластичним деформуванням, різнилося у 4,5 рази на користь застосування вібрації.

Наступним етапом експериментального дослідження було оцінювання взаємозалежності між

зусиллями, необхідними для виконання руху пунсона під час вібраційного та звичайного пластичного деформування бронзових втулок гідравлічних насосів з різними параметрами припусків на подальшу механічну обробку зміцнених поверхонь бронзових втулок гідравлічних насосів типу НШ (рис. 9).

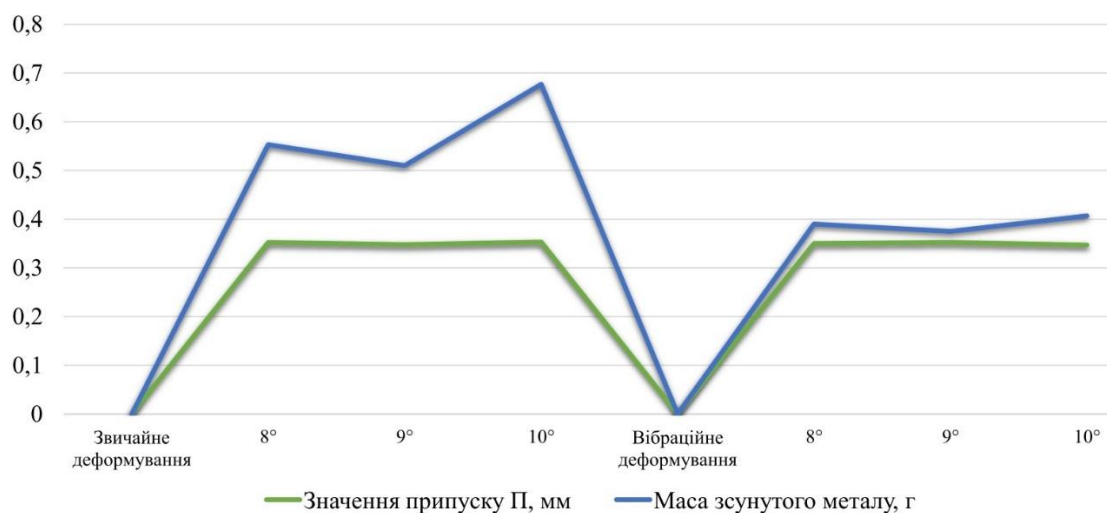


Рис. 8 – Графічне відтворення основних результатів експериментальної частини дослідження щодо визначення закономірностей впливу зміни кута конуса робочих поверхонь пуансонів на кількість зсунутої з обробленої пластичним вібраційним деформуванням бронзи

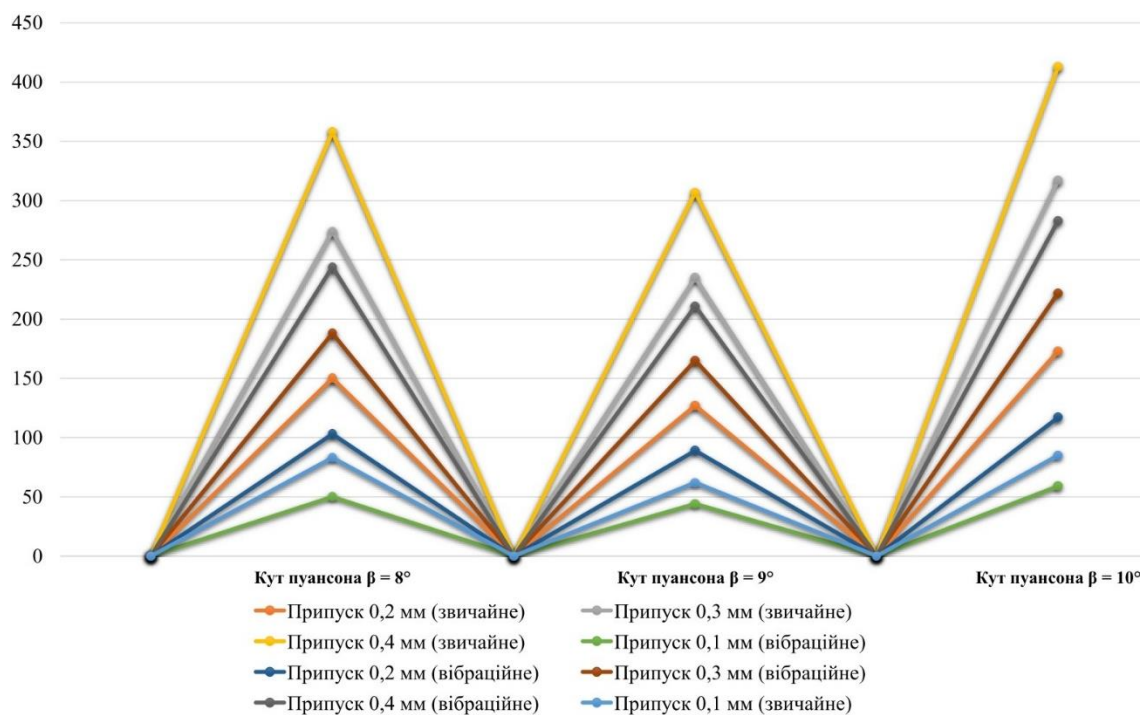


Рис. 9 – Порівняльні графічні залежності впливу на зусилля проходження пуансона при зміцненні поверхонь тертя бронзових втулок гідравлічних насосів типу НШ варіації кутів конуса пуансона та припуску на подальшу обробку зміцнених поверхонь при звичайному та вібраційному деформуванні

Вимірювання кількісних значень зусиль, необхідних для стабільного проходження пуансона при здійсненні звичайного та вібраційного пластичного деформування, здійснювалось за допомогою показників манометра гідравлічного приводу експериментальної вібраційної установки (рис. 5) з подальшим перерахунком.

Основними результатами таких експериментів стали наступні: необхідна сила щодо стабільного проходження пуансона при деформуванні поверхонь тертя зразків втулок гідравлічних насосів, виготовлених із бронзи CuSn5Zn5Pb5, з припуском на подальшу механічну обробку $\Pi = 0,4$ мм, кутом нахилу конусу пуансонів $\beta = 9^\circ$ – відповідно у 4 та 1,44 рази є меншою, за умови порівняння конусів пуансона з кутами нахилу робочих поверхонь $\beta = 8^\circ$ і $\beta = 9^\circ$. Тобто виявлено, що ступінь пластичної деформації бронзи по глибині впливає на додаткове зміцнення приконтактних шарів бронзового сплаву робочої поверхні втулки гідравлічних шестеренних насосів.

При застосуванні додатково вібраційного впливу на зміцнення робочої поверхні тертя бронзової втулки гідравлічного шестеренного насосу, інтенсивність досліджуваних процесів зміцнення шарів бронзи збільшується у рази. Звичайне пластичне деформування щодо кількості зсунутого робочою поверхнею конуса пуансона бронзового сплаву має досить розгалужену зону розсіювання та стохастичну природу експериментальних значень. За умови застосування вібраційних коливань характер досліджуваних описаних процесів стає більш наближеним до пропорційних залежностей.

Умова отримання мінімально можливої масової кількості зсунутого конусом пуансона сплаву бронзи та бронзи, що налипла на такий пуансон, виконується при куті нахилу конуса $\beta = 9^\circ$ як для звичайного, так і для вібраційного пластичного деформування. Закономірності подібних технологічних процесів вібраційного поверхневого зміцнення бронзових втулок гідравлічних насосів типу НШ можливо пояснювати таким чином, що наслідком зменшення кута нахилу робочої поверхні конуса пуансона є збільшення поверхні контакту «бронзова втулка – пуансон». Отже при цьому спостерігаємо збільшення маси бронзи, що налипла на конус пуансона.

Значне збільшення вищезгаданого куту нахилу конуса сталого пуансона призводить до пропорційного зменшення площі контакту «бронзова втулка – пуансон», як наслідок – питомі значення тиску від поверхні пуансона на оброблювану поверхню бронзової втулки також зростають. Останнє також сприяє налипанню часточок бронзового сплаву на конус пуансона.

При застосуванні вібраційного пластичного деформування бронзової втулки гідравлічних насосів, характер, циклічність за знакозмінність руху пуансона відносно оброблюваної поверхні бронзової втулки гідравлічного насосу призводить до зменшення сили тертя поверхні контакту «бронзова втулка – пуансон». Таким чином зменшуються і кількісні показники зсунутого

бронзового сплаву на торець оброблюваної бронзової втулки; пластична деформація у радіальному напрямку при цьому зростає.

Отже, така частина експериментального дослідження дає змогу зробити наступні твердження: використання, з метою зміцнення, пластичного вібраційного деформування робочої поверхні бронзових втулок гідравлічних насосів типу НШ призводить до вирівнювання складових мікроструктури бронзового сплаву в сторону зменшення зернистості останнього; таким чином, застосування вібраційних коливань збільшує ступінь зміцнення поверхневого шару оброблюваної поверхні.

Висновки

1. Низка експериментальних досліджень, що присвячені порівнянню процесів поверхневого пластичного зміцнення втулок гідравлічних насосів типу НШ з метою підвищення якості оброблюваних робочих поверхонь тертя таких втулок, доводять доцільність використання саме вібраційного пластичного деформування.
2. Оптимальним кутом робочих конусних поверхонь сталених пуансонів за вимогою мінімізації маси зсунутої з робочої поверхні втулки бронзи при пластичному вібраційному деформуванні став кут $\beta = 9^\circ$. При цьому маса зсунутого бронзового сплаву, що налипла на робочу поверхню пуансона у випадку застосування вібрації в рази менша у порівнянні зі звичайною обробкою тиском – пластичним деформуванням.
3. Більш рівномірна дрібнозерниста структура бронзового сплаву втулок гідравлічних шестеренних насосів типу НШ, поверхня яких зміцнена вібраційним пластичним деформуванням, призводить до збільшення ресурсу використання спряження підшипників ковзання «шестеренний вал – бронзова втулка» на 10...15%.
4. Отримані результати можуть бути використані для здійснення пластичного вібраційного зміцнення інших бронзових деталей гідравлічних насосів / моторів, наприклад, аксіально-плунжерного чи радіально-плунжерного типу гідростатичної трансмісії.

Перелік використаних джерел

- [1] Hebda A., Łagoda T., Małecka J. Investigating the effects of preliminary overloading and fatigue on the mechanical strength and fractographic characteristics of CuSn7Zn4Pb7 bronze alloy fractures. *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol.163, Part B. Article 108593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2024.108593>.
- [2] Improving a Process for Completing a Positive Connection of Hub-Shaft Type Using Combine Methods / Tarelnyk V., Haponova O., Mościcki T., Tarelnyk N. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proceedings of the 7th International Conference*,

- Pilsen, Czech Republic, 4-7 June 2024. Pp. 392-402. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_34.
- [3] Extra-ductile and strong tin bronze alloy via high-density intragranular ultra-nano precipitation with minimal lattice misfit / K. Chen et al. *Scripta Materialia*. 2023. Vol. 234. Article 115535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115535>.
- [4] The hot deformation of c83600 tin bronze alloy based on Arrhenius constitutive models / Y. Zeng et al. *Proceedings of the 4th International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing and Automation Technology*, Guilin, China, 20-22 October 2023. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3026109>.
- [5] Marquis G. Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines. *Welding in the World*. 2013. № 57(6). Pp. 803-822. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0075-x>.
- [6] Effect of vibro-impact strengthening on the fatigue strength of metallic surfaces / M. Djema et al. *Metal*. 2012. № 5. Pp. 23-25.
- [7] Stotsko Z., Kusy J., Topilnytskyj V. Research of vibratory-centrifugal strain hardening on surface quality of cylindric long-sized machine parts. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*. 2012. Vol. 11. Pp. 15-17.
- [8] Mathematical simulation of motion of working medium at finishing-grinding treatment in the oscillating reservoir / A. Mamalis et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 70(1). Pp. 263-276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>.
- [9] Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State / K. Hamouda et al. *Materials Science*. 2016. Vol. 52. Pp. 216-221. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9946-9>.
- [10] Gichan V. Active control of the process and results of treatment. *Journal of Vibroengineering*. 2011. Vol. 13, iss. 2. Pp. 371-375.
- [11] Jurcius A., Valiulis A., Kumslytis V. Vibratory stress relieving – It's advantages as an alternative to thermal treatment. *Journal of Vibroengineering*. 2008. Vol. 10(1). Pp. 123-127.
- [12] The Impact of Mechanical Vibration on the Hardening of Metallic Surface / M. Djema et al. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 626. Pp. 90-94. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.90>.
- [13] Basics of energy balance of impact contact of metal shot with elastic-plastic half-space / Goryk O., Brykun O., Herashchenko Ye., Tykhonenko V. *Scientific Progress & Innovations*. 2024. Vol. 27, № 4. Pp. 200-207. DOI: <https://doi.org/10.31210/spi2024.27.04.33>.

RESTORATION AND IMPROVEMENT OF ELEMENTS OF HYDRAULIC PUMPS OF THE TYPE «NSH» USING PLASTIC DEFORMATION

Burlaka O.A.	PhD (Engineering), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2296-7234 , e-mail: oleksii.burlaka@pdau.edu.ua ;
Kelemesh A.O.	PhD (Engineering), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9429-8570 , e-mail: anton.kelemesh@pdau.edu.ua ;
Liashenko S.V.	PhD (Engineering), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3227-3738 , e-mail: sergii.liashenko@pdau.edu.ua ;
Honcharenko O.O.	PhD (Engineering), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4325-2705 , e-mail: oleksandr.honcharenko@pdau.edu.ua

This article reviews the results of a scientific study on the feasibility of using plastic vibration deformation of the working surfaces of bronze bushings of sliding bearings of hydraulic gear pumps of the "NSH" type. Such hydraulic pumps have become widely used in modern automobile and tractor manufacturing. In the designs of hydraulic gear pumps, there is a tendency to increase the use of non-ferrous metals and multi-component alloys based on such metals as structural materials. The purpose of the study is considered to be the search for optimal modes of technological processes for plastic vibration hardening of the working surface of bronze bushings of sliding bearings of shafts of hydraulic gear pumps of the "NSH" type. The expected results in this case are an increase in the service life and operational reliability of the hardened working surfaces of bronze bushings. The subject of our research was bronze bushings of sliding bearings of gear shafts of hydraulic pumps NSH-32 and NSH-100. The material of the bushings is bronze CuSn5Zn5Pb5. Experimental research on the processing of working surfaces of bronze bushings of sliding bearings of gear shafts of hydraulic pumps was carried out using special punches, which are made taking into account the geometric dimensions of bronze bushings. The material of the punches is tool steel U7. The relevant elements of the proposed technology for manufacturing experimental punches are obtaining, due to the structural material and heat treatment, the hardness of the working surfaces within 55-58 HRC. The main components of the experimental research are aimed at studying the patterns of the influence

of plastic vibration deformation on the friction surface of bronze bushings of hydraulic gear pumps. Vibrational plastic deformation of the working surface layer of bronze is considered as one of the important elements that can be used in the restoration of bronze bushings or the manufacture of new such bushings for sliding bearings of gear hydraulic pumps. The optimal angle of the working conical surfaces of steel punches in accordance with the requirement of minimizing the mass displaced from the working surface of the bronze bushing during plastic vibrational deformation was the angle $\beta = 9^\circ$. The results obtained can be used to implement plastic vibrational strengthening of other bronze parts of hydraulic pumps/motors, for example, axial-plunger or radial-plunger pumps/motors of hydrostatic transmission.

Keywords: hydraulic pump, bronze bushing, vibration deformation, plasticity, wear, wear resistance, recovery, plastic deformation.

References

- [1] A. Hebda, T. Łagoda, and J. Małecka, "Investigating the effects of preliminary overloading and fatigue on the mechanical strength and fractographic characteristics of CuSn7Zn4Pb7 bronze alloy fractures," *Engineering Failure Analysis*, vol.163, part b, article 108593, 2024. doi: [10.1016/j.eng-failanal.2024.108593](https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2024.108593).
- [2] V. Tarel'nyk, O. Haponova, T. Mościcki, and N. Tarel'nyk, "Improving a Process for Completing a Positive Connection of Hub-Shaft Type Using Combine Methods," in *Proc. of the 7th Int. Conf. «Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII»*, Pilsen, Czech Republic, June 4-7, 2024, pp. 392-402. doi: [10.1007/978-3-031-63720-9_34](https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_34).
- [3] K. Chen et al., "Extra-ductile and strong tin bronze alloy via high-density intragranular ultra-nano precipitation with minimal lattice misfit," *Scripta Materialia*, vol. 234, article 115535, 2023. doi: [10.1016/j.scriptamat.2023.115535](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115535).
- [4] Y. Zeng et al., "The hot deformation of c83600 tin bronze alloy based on Arrhenius constitutive models," in *Proceedings of the 4th International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing and Automation Technology*, Guilin, China, Oct. 20-22, 2023. doi: [10.1117/12.3026109](https://doi.org/10.1117/12.3026109).
- [5] G. Marquis, "Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines," *Welding in the World*, № 57(6), pp. 803-822, 2013. doi: [10.1007/s40194-013-0075-x](https://doi.org/10.1007/s40194-013-0075-x).
- [6] M. Djema, K. Hamouda, A. Babichev, D. Saidi, and D. Halimi, "Effect of vibro-impact strengthening on the fatigue strength of metallic surfaces," *Metal*, № 5, pp. 23-25, 2012.
- [7] Z. Stotsko, J. Kusyj, and V. Topilnytskyj, "Research of vibratory-centrifugal strain hardening on surface quality of cylindric long-sized machine parts," *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, vol. 11, pp. 15-17, 2012.
- [8] A.G. Mamalis, A.I. Grabchenko, A.V. Mitsyk, V.A. Fedorovich, and J. Kundrak, "Mathematical simulation of motion of working medium at finishing-grinding treatment in the oscillating reservoir," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70(1), pp. 263-276, 2014. doi: [10.1007/s00170-013-5257-6](https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6).
- [9] K. Hamouda, H. Bournine, M.A. Tamarkin, A.P. Babichev, D. Saidi, and H.E. Amrou, "Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State," *Materials Science*, vol. 52, pp. 216-221, 2016. doi: [10.1007/s11003-016-9946-9](https://doi.org/10.1007/s11003-016-9946-9).
- [10] V. Gichan, "Active control of the process and results of treatment," *Journal of Vibroengineering*, vol. 13, iss. 2, Pp. 371-375, 2011.
- [11] A. Jurcius, Valiulis A., and V. Kumslytis, "Vibratory stress relieving – It's advantages as an alternative to thermal treatment," *Journal of Vibroengineering*, vol. 10(1), pp. 123-127, 2008.
- [12] M. Djema, K. Hamouda, A. Babichev, D. Saidi, and D. Halimi, "The Impact of Mechanical Vibration on the Hardening of Metallic Surface," *Advanced Materials Research*, vol. 626, pp. 90-94, 2013. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.626.90](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.90).
- [13] O. Goryk, O. Brykun, Ye. Herashchenko, and V. Tykhonenko, "Basics of energy balance of impact contact of metal shot with elastic-plastic half-space," *Scientific Progress & Innovations*, vol. 27, № 4, pp. 200-207, 2024. doi: [10.31210/spi2024.27.04.33](https://doi.org/10.31210/spi2024.27.04.33).

Стаття надійшла 23.09.2025

Стаття прийнята 15.10.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Відновлення та удосконалення елементів гідравлічних насосів типу «НШ» за допомогою пластичного деформування / Бурлака О. А., Келемеш А. О., Ляшенко С. В., Гончаренко О. О. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 321-330. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344986>.

275 ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

UDC 656.135.073

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344988

SOFTWARE AND HARDWARE TOOLS FOR SEA LOGISTICS TRANSPORTATION IN UNCERTAINTY CONDITIONS

Sharko O. D.Sc. (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-7990>, e-mail: mvsharko@gmail.com;
Doroshenko O. postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2999-569X>, e-mail: asdor144@gmail.com

The article considers the issues of modeling and support of management decisions on the development of maritime transport using software and hardware and tools for information support of logistics solutions. It is shown that the management of transport transportation in conditions of uncertainty requires content analysis of information on the possibility of implementing a dialogue between a consumer and a computer, creating an interactive educational environment, identifying the components of this environment, the specifics of their meaningful interpretation. A model of the educational environment of maritime transport logistics is proposed, consisting of system and application software, software and hardware solutions, elements of dynamic support of management processes. The structuring of system and application programming tasks is performed. The content of the platforms of the system software for transport logistics is considered, indicating the implementation programs. The purpose of the components of the application software is described. The means of installing and editing tasks of the application software for transport logistics are highlighted, which include adaptation to the smartphone screen, technical support of the service, adjusting the content to other versions, creating an interactive on one screen. The article describes the means of interaction with the content of the marine information architecture, providing interactive navigation through existing information resources, which include feedback forms, online recordings, interactivity buttons, interactive inserts, phone cameras, archival storage, information blocks, and visual style. Recommendations are made for creating an interactive site for the logistics of marine transport carried out under conditions of uncertainty of the influence of the external environment.

Keywords: interactive management, structuring, knowledge organization, logistics, software and hardware solutions, interactive navigation.

Statement of the problem

As experience shows, information is better absorbed if it is not just passively familiarized with, but also actively interacted with reference to the situation being resolved, in which the goal is achieved by information exchange of elements of this system with the computer.

In order to increase the efficiency of transport logistics management, make timely and adequate decisions for a specific situational situation, an intelligent educational environment for transport transportation in conditions of uncertainty and risk should be created, organizing knowledge at a systemic and qualitatively new level of ensuring the solution of applied problems. Achieving the set goals is possible due to the inclusion of innovative technologies and management tools in the process of knowledge organization.

The typical architecture of transport logistics includes sensors, data processing and server input operations, decision making, execution of control commands, interface of communications and interactions. A systems approach based on the integration of analysis and synthesis of different aspects of logistics systems with the need to select scientifically based tools can be used to study it. The use of a systems approach, software and hardware and tools for sea transport provides for interaction with systems of structured and functionally related elements, the organization of

which requires content analysis of information on the possibilities of dialogue between the consumer and the computer. Formalization of a logistics transport system using software and hardware and tools can serve as the basis for creating an interactive website for sea transport. Service maintenance, interface platforms, query generation, consumer feedback, adaptation to external disturbances and content placement serve as the basis for system analytics of transport logistics and organizing knowledge and necessary information in offline and online modes.

Analysis of the latest achievements on the identified problem

The prospects of using system analysis tools for operational access to information on any element of transport logistics and the dynamics of transportation processes are shown in [1-4]. In the field of software, there is a growing trend to present logistics functionality using web services [5, 6]. Interactive web tools for decision support in independent platforms for web-interface management of the marine environment OCEAN System are described in [7]. The moments of building an architecture for merging analytical processing technologies of software systems with real-time modeling methods are noted.

In [8], the results of creating a distributed virtual environment simulating the behavior of a large number of

users interacting via a global network are described. Architectural solutions for several network servers are presented. A conclusion is made about the need to introduce hardware and software for an extended infrastructure of simulation tools for network servers in various scenarios. An interactive educational system for perceiving logistic information using computer-telecommunication integration of the Internet of Things application and interface technologies is presented in [9]. An application programming interface for business logistics with short messages is implemented.

In [10], describes advances in shipping data analysis and modeling with a focus on mapping maritime flows using big data. Long-term maps of current trends and cyclicity, driven by the dynamics of maritime transport and global international flows, are taken into account to support policies and strategies based on big data. In [11], an integrated software system Flex MoT for managing the visualization of marine sensors in gas production platforms and oil rigs is described, providing situational awareness and advanced decision support. The implemented solutions combine the latest web technologies and interactive presentations using the metaphor of sensory interaction.

In [12], dynamic applications for vehicles integrated with a regional intelligent control and monitoring system for automatic regulation of reactions to extreme external impacts are considered. Logistic processes of combinatorial optimization formalized and implemented as a set of ontologies that allow determining the appropriate optimization method and a list of web services for their implementation are presented in [13]. In [14], an intelligent logistics transport system based on the Internet of Things and artificial intelligence technologies is presented. In [15], artificial intelligence technology is used in the analysis of ship behavior in maritime traffic.

Of interest is the study of the model of emergency planning for mixed multimodal transportation taking into account the variability of situations [16]. An interactive model of hierarchical optimization and an algorithm for decision-making in emergency situations for the planning task are constructed. The role of computerized automated systems in obtaining statistical information about fairways, managing traffic logistics, combating disasters and improving the safety of water transport is described in [17]. The human factor is replaced by a system of automated information services. Human intervention is replaced by an artificial intelligence system.

In the context of Industry 4.0, the concept of a digital twin is integrated into the construction of a logistics model for managing vehicles with a multi-distributed center [18]. The model allows minimizing transportation costs, reducing transportation time, and improving the speed of loading vehicles. The implementation algorithm is based on the cubic display mechanism. The simulation experiment was conducted in accordance with actual business data. In the same direction, the results of using an interactive multimedia computer information system should be considered [19]. The system can combine various media forms: text, image, audio, and video to implement a dynamic display of

information and user experience, allows exchanging data through the interface in real time, and providing visualization and monitoring of transportation.

The presented review of recommendations and generalizations is of a navigational nature and requires studying various tools and workflows.

With the help of software, it is possible to create a step-by-step instruction for obtaining adequate software and hardware solutions, but information on the use of forms and methods for supporting the information component of maritime transport transportation is practically not found. In addition, despite the great potential of the means and tools of information on the generation of possible events for the development of maritime transport logistics in conditions of uncertainty on a regular basis does not exist. A number of significant problems are noted associated with the lack of structuring of software tools for the selected subject area, a weak educational environment for considering the content of system software platforms, installation and editing methods.

Purpose and task statement

The purpose of the work is – structuring of logistics software information, development of recommendations for choosing the format of an interactive environment website, with the help of which information about the subject area being studied can be extracted from existing knowledge under conditions of uncertainty

Tasks of the work:

- build a structuring of system software and application software and tools for maritime transport logistics;
- develop a model of intelligent educational among maritime transport under conditions of uncertainty;
- determine the means of interaction with the content of the maritime information architecture;
- determine the methods and types of installation for editing the intelligent educational environment;
- formulate provisions on the creation of an interactive site for transport logistics software.

Summary of the main material

Transport logistics, from the point of view of the systems approach, can be considered as a set of moving functionally related objects with their properties and relations, united by a common goal. Its use consists in transforming complex logistic problems into a series of tasks implemented using software and appropriate tools with the definition of a set of successive logistic steps in the conditions of changing external environment. Transport logistics software is a computer program that allows the user to interact with the computer through a touch screen, test processors, spreadsheets or other interfaces. In maritime transport logistics, this is manifested in methodological and technical solutions for intelligent educational resources of any level of complexity, functions and options of the system language, computer simulation, analysis and assessment of the

possibility of receiving recommendations, optimization of knowledge testing, illustration of the user interface.

The structure of the logistics transport system can be represented as the interaction of three vectors:

- the vector of system inputs, which are the controlled objects of transport transportation

$$X(t) = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

- vectors of the state space of the system outputs, which are the resulting variables of the transport system, after the introduction of a control action into it

$$Y(t) = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$$

- vectors of internal states of the transport system, which represent organizational characteristics and parameters of the transport scheme

$$S(t) = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$$

The location of the output values in relation to the inputs and internal conditions of the system can be represented in the form

$$Y(t) = F(X(t), S(t)),$$

where F - the operator of transformation of the functional parameters of the system, which can be viewed as logical, algebraic, differential, integral and other operations of transformation of coordinates of vectors $X(t)$, $S(t)$, y vector coordinates $Y(t)$ [4].

It is necessary to directly monitor and select from the permissible multiplicity the solution of the single most effective solution $x^0 \in X$. In a formal setting, this means that it is necessary to know the underlying problem

$$x^0 = \arg \max_{x \in X} E(x)$$

where $E(x)$ – generalized scalar indicator of decision quality.

Managing alternatives are selected depending on the situation, the assessment of which requires diagnostics. The process of changing the state of the system over time

is determined by the dynamics of the transport system, which is characterized by a multidimensional quantity that can take on a number of values at hierarchical levels $y \in Y$.

Denoting the parameter of the process dynamics by t , and the set of its values by T , we have $t \in T$, де $y = y(t)$. The process of the system transitioning from a state with a time parameter value t_0 in the state S with meaning $t > t_0$ we have

$$S_{t_0}(y(t_0)) = y(t), \quad y \in Y, \quad t \in T$$

Having designated the controlling influence on the course of the transport process from the entire possible set of controls through U we have

$$S_{t_0}^u(y(t, u)) = y(t, u), \quad y \in Y, \quad t \in T, \quad u \in U$$

To describe the variability of the process with an indication of the goal, it is necessary to introduce decision-making criteria. Then each individual management alternative can be evaluated by a certain number or value of the corresponding criterion. Then the comparison of alternatives will be reduced to comparing their corresponding numbers.

A model of the educational environment of transport logistics under uncertainty is proposed, which includes elements of dynamic support of the transportation process, system software for transport logistics, application software for transport logistics, software and hardware solutions, tools and features of model settings, interaction with the content of the information architecture. Such a structure of the model is explained by the fact that the interaction of its elements can be described either using a system of equations, constraints and inequalities, which determines its complexity and analysis of structural components, or by introducing various simplifications and exceptions, which reduces its value. Therefore, the model of the educational environment of transport logistics under uncertainty is presented in the form of separate functional blocks (Fig. 1).

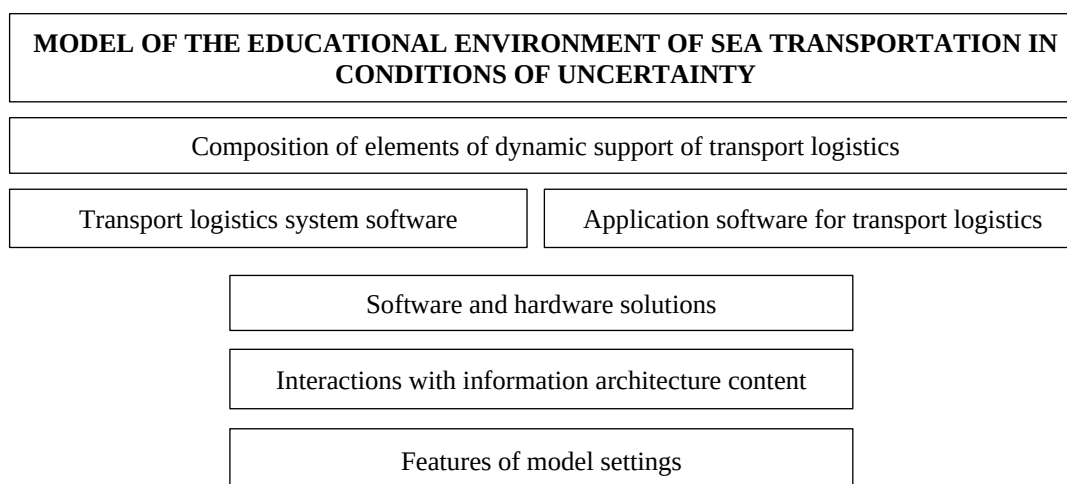


Fig. 1 – Model of educational among sea transport transportation under conditions of uncertainty

One of the requirements of the system approach of maritime transport logistics is to ensure the reliability of management in real time.

The main component block of the construction of the model of the intelligent educational environment is the system software of transport logistics. System programming is the process of creating software that manages the hardware resources of a computer, working with large volumes of

data. The advantages of system programming are the creation of effective and stable software. System software, unlike application software, can work independently.

System software of transport logistics includes the management of complex software systems that automate and optimize the logistics processes of route building, cargo tracking, optimization of transport flows (Fig. 2)

STRUCTURING SYSTEM SOFTWARE FOR TRANSPORT LOGISTICS	
Hardware	Transportation Management
Operating systems	Service – cloud
Device Drivers	Interaction of the parties
Embedded systems	Operational document flow
Interpreters	Tracking cargo on route
Compilers	Preparation of accounting activities
Tablets and smartphones	Optimization of logistics processes

Fig. 2 – Maritime transport logistics system software

Elements of the system software of maritime transport logistics are hardware tools such as operating systems, device drivers, embedded systems, interpreters, compilers. Windows, Linux, MacOS operating systems represent an interface between the computer hardware and other applications. A device driver is a program that allows the operating system to interact with the computer hardware, which includes printers, scanners, sound cards. A compiler is a program that allows the source code of a program to be translated into machine code that can be used on a computer. Embedded systems are used to automate transport management.

Another component of the construction of the intellectual model educational environment is the application software of sea transport.

The application software performs the task of managing sea transport under conditions of uncertainty based on user requests. This allows the user to import and export files, take the necessary resources from the Internet, work with text documents.

As means of application software, we can highlight such programs as: Google Jamboard, Open Board, AWWAPP, Ziteboard, BitPaper. The application software

can be installed on a computer and mobile phone for work in offline and online mode. The main elements of the application software of sea transport logistics are platforms, services, test processors, mobile applications, adaptive layouts, interactive task templates (Fig. 3).

Receiving complete information, the application software calculates route optimization with the transfer of information to the vessel server via web services and a web portal. In the presented model of the intelligent educational environment of sea transport, a block of software and hardware solutions is separately allocated that provide technical support for the system and application software. Software and hardware solutions are the main fundamental block for building a model of the intelligent educational environment of sea transport in conditions of uncertainty. Software and hardware solutions in sea transport are aimed at increasing the efficiency, safety and automation of various logistics processes. They allow remote control of ship mechanisms and include a vessel control system, remote equipment diagnostics, automated control and forecasting systems, communications, real-time data tracking and optimization of ship operations. Risk reduction in management is achieved by identifying any emergency situations.

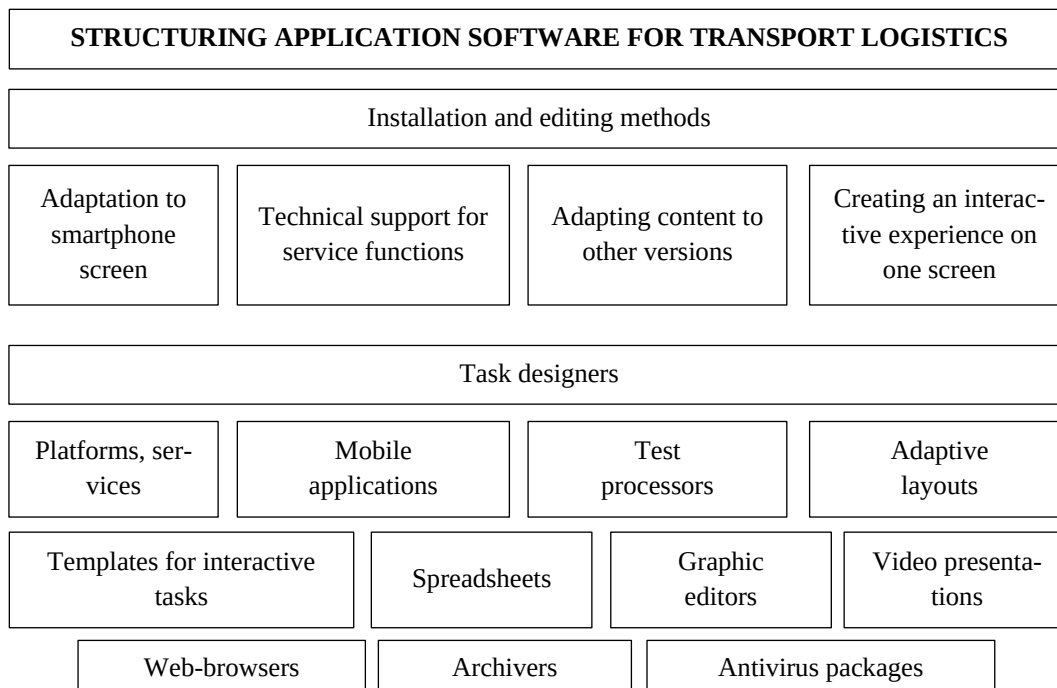


Fig. 3 – Application software for transport logistics

Examples of software and hardware solutions for high-speed vessels of the new generation include semi-naturalistic modeling complexes in the field of software, integrated bridge systems with remote diagnostics of equipment, means of fighting for the survivability of the vessel, equipment for external and internal ship communications, allowing to organize the control of the vessel by one watchman. The predictive analytics system for continuous monitoring of vibrations and elastic deformations with signaling of deviations via a digital communication channel combines ship software hardware complexes based on satellite data and forecasts of the hydrometeorological situation. The emergency warning signaling system for operational monitoring of the technical condition with control from the wheelhouse and central control of the Grapix Gate software and hardware complex automates control and optimizes

logistics. Distributed registry technologies and the use of cloud forms in the creation of services for the automation of business processes are formed on blockchain platforms for storing and exchanging information using online applications for the formation and maintenance of a digital registry of transactions in several places simultaneously. IBM Corporation has launched an application for shipping companies specializing in the automation of maritime trade, which takes advantage of the possibilities of introducing elements of artificial intelligence and the Internet of Things.

A separate block in the model of the interactive educational environment of maritime transport logistics presents the means of interaction with the content of the information architecture (Fig. 4).

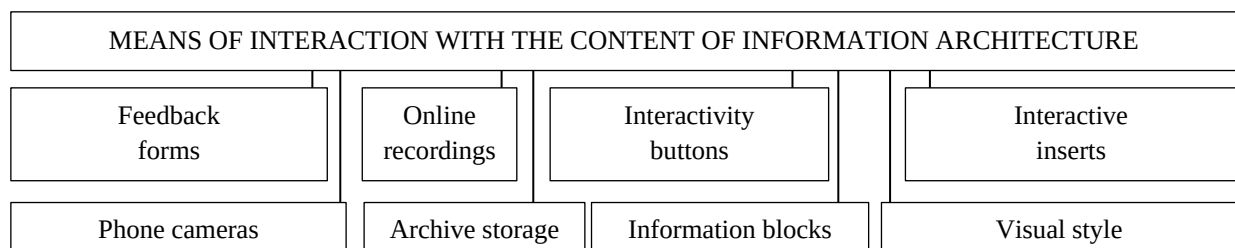


Fig. 4 – Means of interaction with the content of information architecture

Intelligentization of maritime transport operations in conditions of uncertainty requires continuous replenishment of input information from various sources hidden by

a large amount of poorly structured information. This requires content creation. Content, according to its main purpose, is the content of web pages, channels, various

programs and networks that make up an information package. Therefore, it can also be expressed as the reason why a user visits a website. Content serves as a means of orientation and searching for necessary information in the entire labyrinth of source information. Information architecture and the content of its provision are the basis of the logistics of maritime transport. They serve as a means of maintaining the immutability of transport flow parameters and coordinating the actions of all transport links on interactive maps. Together, they form a set of processes for organizing structured information for navigation on websites with the distribution of cognitive load through appropriate

interfaces and dialog boxes. Their use gives the user a reference point in the diversity of existing resources, specifying the meaning of their use and the search system.

Editing of the model of the intelligent educational environment can be achieved using graphic editors, video presentations, web browsers, archivers, antivirus packages. The search engine itself selects the site according to the relevant content.

Features of the setup and implementation of the model of the intelligent educational environment of maritime transport logistics are presented in Fig. 5.

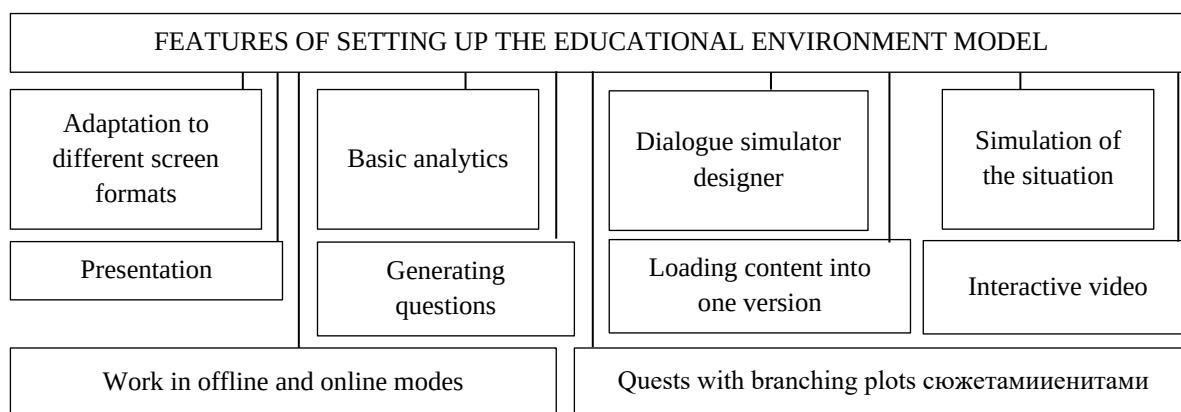


Fig. 5 – Features of setting up the educational environment model

The presented structuring reveals the capabilities of the educational environment model, manifested in the processing of requests, receiving responses and storing data.

Interactive sites are platforms for interaction with content in a non-standard format. In interactive sites, thanks to the built-in web browser, access to any content is provided. Interactive site-architect of user behavior.

When opening a search browser to form a request, a well-organized site is needed. With the organization of information, its structuring and the creation of appropriate web resources, convenient for the user. Structuring information helps to take into account the interests of the user and serves as a way to facilitate the search for the necessary information in the entire labyrinth of existing information.

The semantic content of the interactive site is to optimize technical applications for obtaining information by any user agent, such as a smartphone. Multimedia presentations allow interactive interaction with existing educational resources. Such interactive navigation is reliably provided by means of interaction with content, which include feedback forms, online recordings, interactivity buttons, interactive inserts, phone cameras, archive storage, information blocks, visual style. To create an interactive site for maritime transport logistics, it is necessary to decide on the solution to the issue of what is achieved by introducing a non-standard format for interacting with content and why information cannot be packaged in a regular text format. In addition to the values achieved in this case,

obtaining an information product of user interaction with possible changes in the external environment and prompt response to emerging situations, financial constraints and technical capabilities of the platform being presented must be taken into account, which can be achieved through software and hardware solutions for transport transitions in conditions of uncertainty.

Another important issue that needs to be addressed when creating interactive sites is key information and presentation of management principles. Key information is obtained by using a large set of ready-made libraries, with the help of which it is possible to develop almost any functionality of a vehicle in the format of an endless picture of situational interactions with possible accompanying effects and interrelations. Scrolling goes not only in breadth, covering all new aspects of transportation, but also in depth, covering the history of possible disasters and failures.

Orientation to the dialog mode of operation provides that all management procedures in the time and space domain are detailed on a set of elements, taking into account the limitations and resource capabilities in the range of change of the target function and elements of technical implementation.

The developed interactive environment of sea transportation under uncertainty, which organizes knowledge at a systemic and qualitative level, will contribute to increasing the efficiency of the management process.

By collecting and processing huge amounts of data, building forecasts, and accelerating information exchange, intelligent interactive solutions are becoming the main tool for optimizing management decisions and dynamically processing available information on the development of maritime transport in conditions of uncertainty, capable of adapting to changes in external situations using simulations and software components of the content specific to freight transport

Conclusions

1. Interactive sites for optimizing technical applications for functional applications of maritime transport logistics allow searching for possible interactions with the consumer not only in a regular text format, but also in the form of an information product indicating ongoing changes in the conditions of the transport transition. The described software and hardware solutions of the intelligent educational environment will provide a presentation of management principles in a non-standard form using elements of interaction with content and possible connections and interactions in the dialog mode of operation.

2. Structuring of system software and tools with division into interfaces of hardware and transportation management can serve as a tool for automating management of technological applications for optimizing logistics processes. Structuring of application software designed to solve problems of transport management based on consumer requests allows working with text documents, receiving requests from Internet resources.

3. The proposed model of the educational environment of transport logistics under uncertainty in the form of functional blocks of system and application software with hardware and software solutions contributes to the speed and reliability of managing maritime transport in real time. Hardware and software solutions allow remote control of ship mechanisms, tracking data in real time, and optimizing logistics. Risk reduction in management is achieved by identifying any abnormal situations.

References

- [1] L. Achkasova, "Mistse i rol transportnoi lohistyky u zahalnoi lohistychnii skhemi" ["Place and role of transport logistics in the general logistic system"], *Ekonomika transportnoho kompleksu – Economics of the transport complex*, vol. 30, pp. 77-86, 2017. (Ukr.)
- [2] O.A. Hodoskina, V.D. Anasovich, and A.I. Hilkevich, "Rol transportnoi lohistyky u diialnosti promyslovoho pidpriemstva" ["The role of transport logistics in the activities of industrial enterprises"], *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress*, № 2(80), pp. 49-58, 2019. doi: [10.15802/stp2019/164942](#). (Rus.)
- [3] O.P. Kirkin, V.I. Kirkina, and T.Y. Kirkina, "Novie analytycheskiye metody upravleniya transportnymi potokamy na baze systemnykh yssledovaniy v lohystyke" ["New analytical techniques for traffic management on the basis of system studies in logistics"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 34, pp. 209-216, 2017. (Rus.)
- [4] O.V. Sharko, A.V. Buketov, K.M. Klevtsov, O.O. Sapronov, and V.V. Sotsenko, "Strukturyzatsiia informatsii dlia systemnoho analizu transportnoi lohistyky" ["Structuring information for system analysis of transport logistics"], *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання – Applied questions of mathematical modelling*, vol. 8, № 1, pp. 262-270, 2025. doi: [10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-26](#). (Ukr.)
- [5] O. Sharko, and O. Doroshenko, "Increasing the efficiency of transport by optimising the management structure of complex logistics scheme," *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transportu – Advances in mechanical engineering and transport*, № 1(24), pp. 89-101, 2025. doi: [10.36910/automash.v1i24.1712](#).
- [6] O.V. Sharko, O.S. Doroshenko, and Y.S. Zhyshchynskyi, "Improving the efficiency of transport logistics in conditions of uncertainty and risk," in *Proc. of the XVII Int. Sci.-Pract. Conf. «Modern information and innovative technologies in transport»*, Odesa, Ukraine, May 28-30, 2025, pp. 245-248.
- [7] A. Racicota, "Web-based Open Source GIS decision support tools: Explaining the software stack," in *Proceedings of the iEMSs 3rd Biennial Meeting, Summit on Environmental Modelling and Software*, Burlington, USA, July 9-13, 2006.
- [8] C. Bouras, E. Giannaka, and T. Tsiatsos, "A framework model for DVEs using SIMUL8," in *Proc. of the 2nd Int. ICST Conf. on Simulation Tools and Techniques*, Rome, Italy, March 2-6, 2009. doi: [10.4108/simutools.2009.5673](#).
- [9] Y.L. Yang, "Logistic information perception interactive system formed by combination of RFID and TC35i," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 52-54, pp. 2151-2156, 2011.
- [10] C. Ducruet, *Advances in Shipping Data Analysis and Modeling: Tracking and Mapping Maritime Flows in the Age of Big Data*. Taylor & Francis Ltd, 2017.
- [11] T. Ruth, S. Audersch, S. Kluge, and U.F. Von Lukas, "From sensor to situational awareness," in *Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, Monterey, USA, Sept. 19-23, 2016, article 7761249. doi: [10.1109/OCEANS.2016.7761249](#).
- [12] O. Gusikhin, A. Shah, O. Makke, A. Smirnov, and N. Shilov, "Dynamic cloud-based vehicle apps information logistics in disaster response," in *Proc. of the 4th Int. Conf. on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, Funchal, Madeira, Portugal, March 16-18, 2018, pp. 626-635. doi: [10.5220/0006815606260635](#).

- [13] A. Ahmad, M. Bouneffa, H.I. Hendi, and C. Fonlupt, "Assisted discovery of optimal solution for logistics problems using ontology modelling," *International Journal of Logistics Systems and Management*, vol. 44(1), pp. 85-104, 2023. doi: [10.1504/IJLSM.2023.128559](https://doi.org/10.1504/IJLSM.2023.128559).
- [14] M.H. Alkinani, A.A. Almazroi, M. Adhikari, and V.G. Menon, "Artificial intelligence-empowered logistic traffic management system using empirical intelligent xgboost technique in vehicular edge networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24(4), pp. 4499-4508, 2023. doi: [10.1109/TITS.2022.3145403](https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3145403).
- [15] Y. Wen, W. Tao, Z. Sui, M.A. Piera, and R. Song, "Dynamic model-based method for the analysis of ship behavior in marine traffic situation," *Ocean Engineering*, vol. 257, article 111578, 2022. doi: [10.1016/j.oceaneng.2022.111578](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111578).
- [16] Y. Song, B. Sun, Y. Han, and Z. Xing, "Research on the water-ground multimodal transport emergency scheduling model and decision-making method considering the actual road network inundation situation," *Risk Analysis*, vol. 45(3), pp. 600-622, 2025. doi: [10.1111/risa.17450](https://doi.org/10.1111/risa.17450).
- [17] K.J. James, V.V. Shenoy, M. Bhasi, and C.G. Nandakumar, "Automated ICT systems in inland waterways by developing a multiflow river information services system," *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, vol. 10(2), pp. 389-402, 2019.
- [18] Y. An, Y. Han, Y. Xu, S. Ouyang, M. Zhang, and S. Chen, "An auxiliary model of intelligent logistics distribution management for manufacturing industry based on refined supply chain," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 47098-47111, 2023. doi: [10.1109/ACCESS.2023.3275010](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3275010).
- [19] Y. Wang, and Y. Luo, "Real time economic data sharing of computers through interactive multimedia systems," in *Proc. of the Int. Conf. on Integrated Intelligence and Communication Systems*, Kalaburagi, India, Nov. 24-25, 2023, pp. 1339-1347.

ПРОГРАМНІ ТА АПАРАТНІ ЗАСОБИ ДЛЯ МОРСЬКИХ ЛОГІСТИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Шарко О.В.

д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-7990>, e-mail: mvsharko@gmail.com;

Дорошенко О.С.

аспірант, Херсонська державна морська академія, Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2999-569X>, e-mail: asdor144@gmail.com

Розглянуто питання моделювання та підтримки прийняття управлінських рішень щодо розвитку морських транспортних перевезень з використанням програмно-апаратних засобів та інструментарію інформаційного супроводу логістичних рішень. Показано, що керування транспортними перевезеннями в умовах невизначеності вимагає контент-аналізу інформації про можливість здійснення діалогу споживача з комп'ютером, створення інтерактивного освітнього середовища, виявлення компонентів цього середовища, специфіки змістовної інтерпретації. Запропоновано модель освітнього середовища морської транспортної логістики, що складається із системного та прикладного програмного забезпечення, програмно-апаратних рішень, елементів динамічного супроводу процесів управління. Виконано структурування завдань системного та прикладного програмування. Структурування прикладного програмного забезпечення, призначеного для вирішення задач управління транспортом на основі запитів споживачів, дозволяє працювати з текстовими документами, отримувати запити з інтернет-ресурсів. Розглянуто зміст платформ системного програмного забезпечення транспортної логістики із зазначенням реалізаційних програм. Описано призначення компонентів прикладного програмного забезпечення. Виділено засоби встановлення та редагування завдань прикладного програмного забезпечення транспортної логістики, в якості яких обрані адаптація під екран смартфона, технічна підтримка сервісу, підстроювання контенту під інші версії, створення інтерактиву на одному екрані. Наводиться опис засобів взаємодії з контентом морської інформаційної архітектури, що забезпечують інтерактивну навігацію по існуючим інформаційним ресурсам, в якості яких вибрані форми зворотного зв'язку, онлайн-записи, кнопки інтерактивності, вставки, камери телефону, архівні сховища, інформаційні блоки, візуальна. Складено рекомендації щодо створення інтерактивного сайту логістики морських транспортних перевезень, які здійснюються в умовах невизначеності впливу зовнішнього середовища.

Ключові слова: інтерактивне керування, структурування, організація знань, логістика, програмно-апаратні рішення, інтерактивна навігація.

Перелік використаних джерел

- [1] Ачкасова Л. М. Місце і роль транспортної

логістики у загальній логістичній схемі. *Економіка транспортного комплексу*. 2017. Вип. 30. С. 77-86.

- [2] Ходоскина О. А., Анасович В. Д., Хилькевич А. И. Роль транспортной логистики в деятельности промышленного предприятия. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2019. № 2(80). С. 49-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/164942>.
- [3] Киркин А. П., Киркин В. И., Киркина Т. Ю. Новые аналитические методы управления транспортными потоками на базе системных исследований в логистике. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2017. Вип. 34. С. 209-216.
- [4] Структуризація інформації для системного аналізу транспортної логістики / О. В. Шарко та ін. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2025. Т. 8, № 1. С. 262-270. DOI: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modeling/2025-8-1-26>.
- [5] Sharko O., Doroshenko O. Increasing the efficiency of transport by optimising the management structure of complex logistics scheme. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорту*. 2025. № 1(24). Pp. 89-101. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1712>.
- [6] Sharko O. V., Doroshenko O. S., Zhyshchynskyi Y. S. Improving the efficiency of transport logistics in conditions of uncertainty and risk. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса, 28-30 травня 2025 р.* Pp. 245-248.
- [7] Racicota A. Web-based Open Source GIS decision support tools: Explaining the software stack. *Proceedings of the iEMSs 3rd Biennial Meeting, Summit on Environmental Modelling and Software*, Burlington, USA, 9-13 July 2006. 6 p.
- [8] Bouras C., Giannaka E., Tsiatsos T. A framework model for DVEs using SIMUL8. *2nd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, Rome, Italy, 2-6 March 2009. DOI: <https://doi.org/10.4108/simutools.2009.5673>.
- [9] Yang Y. L. Logistic information perception interactive system formed by combination of RFID and TC35i. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 52-54. Pp. 2151-2156.
- [10] Ducruet C. *Advances in Shipping Data Analysis and Modeling: Tracking and Mapping Maritime Flows in the Age of Big Data*. Taylor & Francis Ltd, 2017. 448 p.
- [11] From sensor to situational awareness / Ruth T., Audersch S., Kluge S., Von Lukas U.F. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, Monterey, USA, 19-23 September 2016. Article 7761249. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761249>.
- [12] Dynamic cloud-based vehicle apps information logistics in disaster response / O. Gusikhin et al. *Proceedings of the 4th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, Funchal, Madeira, Portugal, 16-18 March, 2018. Pp. 626-635. DOI: <https://doi.org/10.5220/0006815606260635>.
- [13] Assisted discovery of optimal solution for logistics problems using ontology modelling / Ahmad A., Bouneffa M., Hendi H. I., Fonlupt C. *International Journal of Logistics Systems and Management*. 2023. Vol. 44(1). Pp. 85-104. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2023.128559>.
- [14] Artificial intelligence-empowered logistic traffic management system using empirical intelligent xgboost technique in vehicular edge networks / Alkinani M. H., Almazroi A. A., Adhikari M., Menon V. G. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023. Vol. 24(4). Pp. 4499-4508. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3145403>.
- [15] Dynamic model-based method for the analysis of ship behavior in marine traffic situation / Y. Wen et al. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 257. Article 111578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111578>.
- [16] Research on the water-ground multimodal transport emergency scheduling model and decision-making method considering the actual road network inundation situation / Song Y., Sun B., Han Y., Xing Z. *Risk Analysis*. 2025. Vol. 45(3). Pp. 600-622. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.17450>.
- [17] Automated ICT systems in inland waterways by developing a multiflow river information services system / James K.J., Shenoy V.V., Bhasi M., Nandakumar C.G. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. 2019. Vol. 10(2). Pp. 389-402.
- [18] An auxiliary model of intelligent logistics distribution management for manufacturing industry based on refined supply chain / Y. An et al. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. Pp. 47098-47111. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3275010>.
- [19] Wang Y., Luo Y. Real time economic data sharing of computers through interactive multimedia systems. *International Conference on Integrated Intelligence and Communication Systems*, Kalaburagi, India, 24-25 November 2023. Pp. 1339-1347.

Стаття надійшла 08.09.2025

Стаття прийнята 27.09.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Sharko O., Doroshenko O. Software and hardware tools for sea logistics transportation in uncertainty conditions. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 331-339. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344988>.

**ПРАВОВІ КОЛІЗІЇ В ПРАКТИЦІ ОРГАНІЗАЦІЇ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ
ЗА УЧАСТЮ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ: РИЗИКИ ТА УПРАВЛІНСЬКІ НАСЛІДКИ
В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

Ібрагім А.М. аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6007-5708>, e-mail: arturibrahim97@gmail.com;
Клевцов К.М. д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8486-1104>, e-mail: klevtsovka@i.ua

У статті проаналізовано ключові організаційні проблеми та управлінські ризики, що виникають у практиці мультимодальних перевезень за участю морського транспорту через фрагментарність міжнародного та національного законодавства. Досліджено, як правові колізії впливають на ефективність логістичних ланцюгів, особливо в умовах надзвичайних ситуацій. Метою роботи є ідентифікація системних недоліків у правовому полі та розробка практичних рекомендацій для мінімізації їх негативного впливу на транспортний процес. Методологія дослідження поєднує порівняльний аналіз ключових міжнародних конвенцій та Закону України «Про мультимодальні перевезення вантажів» із системним підходом до оцінки їх наслідків для транспортних операторів та вантажовласників. Встановлено, що впроваджена в Україні мережева модель відповідальності на практиці створює «клаптикову» систему компенсації, що генерує значні фінансові та операційні ризики для учасників ринку, ускладнює процеси страхування та врегулювання претензій. Проаналізовано практичні наслідки таких колізій, як збереження архайчної норми про звільнення перевізника від відповідальності за навігаційну помилку, що знижує надійність морського етапу перевезення та розбіжність у строках позовної давності. Окрему увагу приділено впливу правового вакууму в регулюванні перевезень в умовах воєнного стану, що створює управлінський параліч у питаннях страхування військових ризиків. Обґрунтовано, що відсутність імперативної норми щодо цифровізації документообігу, на відміну від права ЄС, створює нетарифні бар'єри та гальмує інтеграцію в європейський транспортний простір. Наукова новизна полягає у розробці пропозицій, спрямованих на вдосконалення управлінських та організаційних аспектів перевезень шляхом реформування правової бази. Запропоновано конкретні кроки для гармонізації законодавства, що дозволить підвищити прогнозованість, безпеку та ефективність мультимодальних ланцюгів постачання.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, морські перевезення, транспортне право, відповідальність оператора, правові колізії.

Постановка проблеми

Ефективне функціонування глобальних ланцюгів постачання нерозривно пов'язане із застосуванням мультимодальних технологій, які дають змогу організувати доставку вантажів за принципом «від дверей до дверей». Ключовим елементом таких перевезень, особливо в контексті міжнародної торгівлі України, є мультимодальні перевезення з участю морського транспорту, що поєднують високу провізну здатність морських ліній із гнучкістю наземної доставки. Організація такого процесу вимагає чіткої взаємодії не лише різних видів транспорту, а й узгодженості дій усіх учасників: вантажовласників, операторів, перевізників та терміналів. Однак на практиці ця технологічна та організаційна єдність наражається на суттєві перешкоди, що генеруються розбіжностями у правовому полі. Ефективність мультимодального процесу регулюється комплексом міжнародних конвенцій та національних законодавчих актів, які часто є неузгодженими між собою. Для України, що інтегрується в європейський економічний простір, ця проблема набуває особливої гостроти, адже гармонізація законодавства є інструментом для підвищення конкурентоспроможності національної транспортної системи.

Проблема полягає в тому, що існуючі правові колізії та нормативні прогалини створюють не абстрактні юридичні ризики, а цілком конкретні операційні бар'єри та технологічні розриви в ланцюгу постачання. Неузгодженість у визначенні відповідальності сторін, різні вимоги до оформлення перевізних документів та відмінності у процедурах митного контролю призводять до затримок вантажів на стиках видів транспорту, провокують непередбачувані фінансові витрати та знижують надійність усього логістичного ланцюга. Таким чином, виникає нагальна науково-практична потреба в системному аналізі впливу правових колізій на ефективність організації мультимодальних перевезень та розробці організаційно-технологічних рішень для мінімізації їх негативних наслідків для транспортного процесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання нормативно-правового регулювання мультимодальних вантажних перевезень активно досліджується у вітчизняній та світовій науковій літературі. Так український дослідник Чернега В.М. здійснив аналіз Закону України «Про мультимодальні перевезення» та наголошує на важливості гнучких норм, ролі оператора мультимодального перевезення й договірної

моделі регулювання. Також автор обґрунтовує, що ефективне правове регулювання залежить не лише від нормативної бази, а й від функціонування правової культури, свідомості та саморегулюючих механізмів. Група дослідників під керівництвом Ільченко С.В. здійснює комплексний аналіз викликів, котрі впливають на втілення державної політики в напрямку управління мультимодальними та інтермодальними перевезеннями вантажів. Платонов О.І. акцентує увагу на відсутності єдиної дефініції поняття «механізм державного регулювання мультимодальних перевезень». Автор здійснює етимологічний і правовий аналіз терміна та пропонує методологію його уніфікації із застосуванням стейкхолдер-підходу. У роботах підкреслено фрагментарність міжнародного й національного правового поля та обґрунтовано необхідність гармонізації термінології для ефективного регулювання мультимодальних перевезень. Добровольська В.В. досліджує господарсько-правові засади змішаних (мультимодальних) перевезень за участю морського транспорту, акцентуючи увагу на їх комплексному характері, нормативному регулюванні та договірній природі. Авторка аналізує вимоги до легалізації перевізника, умови договору перевезення та класифікацію мультимодальних перевезень з урахуванням міжнародних правових актів (зокрема, Конвенції ООН 1980 р.) [1].

Водночас, розглядаючи історіографію питання, варто зазначити, що системне обґрунтування термінологічних розбіжностей у цій сфері було закладено в українській науці ще раніше. У 2011 році українські дослідники Кириллов Ю.І. та Кириллова О.В. в своїй роботі вперше детально проаналізували проблему, що виникла через некоректний переклад Конвенції ООН 1980 року. Вони встановили, що в англomовному тексті використано термін «*multimodal*», тоді як в офіційному українськомовному перекладі подано «*змішані*», що зумовило їх паралельне, хоча й некоректне, використання як рівнозначних. Саме ці дослідники першими довели, що ототожнення згаданих понять є методологічною помилкою, і встановили, що поняття «комбіновані», «інтермодальні» та «мультимодальні» перевезення є вужчими формами прояву змішаних перевезень. Подальший розвиток ці напрацювання отримали у фундаментальному дисертаційному дослідженні Кириллової О.В. (2017 р.) [2].

Продовжуючи аналіз термінологічних розбіжностей вже у контексті сучасного законодавства, варто звернутися до праці Кириллової О.В. та Кириллової В.Ю., які детально досліджують суперечності між Законом України «Про мультимодальні перевезення» та міжнародними нормами. Автори вказують на критичні недоліки нового закону, зокрема на повну відсутність поняття «інтермодальне перевезення», яке є ключовим у світовій практиці та законодавстві ЄС. Особливу увагу вони приділяють термінологічній колізії у визначенні «комбінованого перевезення»: в українському законі воно визначається через поняття «мультимодальне перевезення», тоді як міжнародні стандарти

трактують його виключно як різновид «інтермодального». Така підміна понять, за словами дослідників, у майбутньому неминуче призведе до негативних наслідків в організації та практичній реалізації перевезень [3].

Кунда Н.Т. проводить комплексний аналіз міжнародно-правового регулювання морських вантажних перевезень, зосереджуючись на еволюції відповідальності перевізника у Гаазьких, Гаазько-Вісбійських, Гамбурзьких і Роттердамських правилах. Авторка вказує на недосконалість існуючої багатомодальної нормативної бази та необхідність уніфікації, особливо в контексті цифровізації документообігу та доставки «від дверей до дверей». Наголошує на важливості приєднання України до основних міжнародних конвенцій для зміцнення її статусу як морської держави.

Серед зарубіжних дослідників питання нормативного регулювання мультимодальних вантажних перевезень займалися також ряд науковців. Зокрема хорватський дослідник Ясенко Марін, доктор філософії юридичного факультету Загребського університету, аналізує проблему відсутності єдиного міжнародно-правового регулювання для мультимодальних перевезень вантажів. Він наголошує, що наявна правова база є фрагментарною, складається з низки унімодальних конвенцій, положення яких щодо відповідальності перевізника суттєво відрізняються. Це створює правову невизначеність для операторів змішаних перевезень (ОЗП), особливо у випадках нелокалізованої втрати вантажу. Доктор Бейбі Він із М'янми розглядає проблеми, що виникають при змішаних перевезеннях вантажів, такі як визначення основи відповідальності, періоду відповідальності, виключень та обмежень відповідальності, а також строку позовної давності. Наголошує на важливості єдиного договору перевезення для вирішення колізій законів та різних питань відповідальності у сфері змішаних перевезень. Наголошують у своїх дослідженнях на відсутності уніфікації в цій сфері і словацькі дослідники Єкатеріна Саламахіна і Мілош Поляк.

Загалом аналіз стану наукової розробки теми дозволяє виділити кілька ключових напрямів у міжнародних дослідженнях:

- Перший напрям пов'язаний із фундаментальною дискусією щодо оптимальної моделі відповідальності оператора мультимодального перевезення. У доктрині транспортного права склалися два протилежні підходи: система єдиної відповідальності, що передбачає застосування єдиних правил відповідальності протягом усього маршруту, та система мережевої відповідальності, за якої відповідальність оператора визначається правом, що застосовується до того етапу перевезення, на якому сталося пошкодження вантажу.

- Другий напрям досліджень концентрується на правовій природі єдиного перевізного документа. Вчені аналізують його функції, можливість бути товаророзпорядчим документом та перспективи повної цифровізації.

- Третій, найбільш широкий напрям, охоплює порівняльний аналіз міжнародних конвенцій, що конкурують між собою. Основна увага приділяється порівнянню застарілих, але поширених Правил Гаага-Вісбі, більш прогресивних, але менш популярних Гамбурзьких правил та революційних, проте не універсально прийнятих Роттердамських правил.

Незважаючи на великий перелік наукових досліджень в даній галузі, залишається ряд питань, котрі залишаються не висвітленими і являють собою поле для майбутніх наукових досліджень. Зокрема слід виділити такі прогалини:

- аналіз наукової літератури в даній галузі показує, що більшість наукових публікацій було зроблено до прийняття Закону України «Про мультимодальні перевезення вантажів». Тому серед них немає робіт, котрі б висвітлювали правозастосовну практику даного закону, а саме вивчали б його вплив на ринок та перші судові прецеденти.

- майже не вивчено правове регулювання мультимодальних вантажних перевезень в умовах надзвичайної ситуації – повномасштабної війни, що включає страхування військових ризиків, зміну логістичних коридорів постачання та різного роду форс-мажорних обставин.

- недостатньо уваги приділяється дослідженню цифровізації мультимодальних перевезень на шляху до уніфікації із законодавством ЄС.

Слід зауважити, що незважаючи, на такий важливий крок, як прийняття в 2021 році Закону України «Про мультимодальні перевезення вантажів», правове поле України у сфері мультимодальних перевезень є неузгодженим та негармонізованим із міжнародними режимами. Це спричиняє правові ризики та стримує розвиток транспортної галузі в цілому. Є цілий ряд колізій між нормами даного закону та транспортними кодексами та статутами.

Мета статті

Метою нашого дослідження є проведення системного порівняльного аналізу підходів до правового регулювання мультимодальних перевезень на міжнародному та національному рівнях. Це обумовлено необхідністю виявлення та усунення існуючих правових недоліків, які негативно впливають на розвиток галузі вантажних перевезень. На основі отриманих результатів планується розробити та обґрунтувати практичні рекомендації для вдосконалення законодавства України.

Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

- систематизувати наукові підходи до основних понять і механізмів, пов'язаних із мультимодальними перевезеннями;

- визначити наукову новизну дослідження, встановивши аспекти, котрі ще не були висвітлені у правовій науці;

- провести критичний огляд існуючих нормативно-правових режимів у сфері мультимодальних перевезень та з'ясувати причини відсутності уніфікації;

- провести аналіз чинного законодавства України. Встановити його недоліки, прогалини та суперечності;

- розробити пропозиції щодо вдосконалення національного законодавства у цій галузі.

Матеріали та методи

Об'єктом даного дослідження є процес організації та функціонування мультимодальних перевезень, що включають морський етап транспортування.

Предметом дослідження виступають правові колізії, управлінські ризики та організаційні наслідки, що виникають через фрагментарність і неузгодженість міжнародного та національного законодавства, особливо в умовах надзвичайних ситуацій.

Методологічну основу роботи становить поєднання системного підходу та порівняльно-правового методу. Системний підхід застосовано для оцінки впливу правових недоліків на весь логістичний ланцюг як єдиний комплекс, виявляючи, як нормативні прогалини створюють операційні бар'єри та фінансові ризики для всіх учасників. Порівняльно-правовий метод використано для критичного аналізу ключових міжнародних та вітчизняних нормативно-правових актів.

Виклад основного матеріалу

Історичний аналіз розвитку правової бази у сфері міжнародних вантажних перевезень свідчить про поступовий перехід від фрагментованого національного регулювання до спроб глобального уніфікування. До XIX століття кожен вид транспорту функціонував автономно, а кожен сегмент мультимодального маршруту розглядався як окремий етап перевезення, що регулювався власним, часто національним, правовим режимом. Процес правової уніфікації розпочався насамперед у сфері міжнародного транспортного права, що призвело до формування двох основних груп багатосторонніх договорів: глобальних договорів, які охоплюють морський та авіаційний транспорт, та регіональних договорів, що стосуються наземного транспорту, зокрема залізничного і автомобільного в Європі, Азії та Північній Африці.

У сфері морських перевезень Гамбурзькі правила мали на меті замінити Брюссельську конвенцію; в авіаційних перевезеннях Варшавську конвенцію було змінено шляхом прийняття Гаазького протоколу (1955) та Монреальського протоколу (1975); у залізничному транспорті конвенції ЦІМ були замінені системою КОТІФ 1980 року.

Особливою проблемою було створення єдиного правового режиму для змішаних (мультимодальних) перевезень. Однією з таких спроб уніфікації стало укладення Конвенції про міжнародне перевезення вантажів мультимодальними засобами, положення якої базувалися на Гамбурзьких правилах. Проте досвід

застосування цієї конвенції, як і самих Гамбурзьких правил, показав, що підхід, заснований на міжнародних конвенціях, в останні роки виявився менш ефективним. У відповідь на це почали з'являтися альтернативні механізми регулювання для заповнення правових прогалів.

Зокрема, Міжнародна торгова палата ще у 1973 році опублікувала Уніфіковані правила, що регулюють комбінований транспортний документ (Правила МТП № 298). На їх основі згодом були розроблені рамкові проформи документів, як-от «Комбідок». Важливу роль також відіграла Міжнародна федерація асоціацій експедиторів (ФІАТА), яка розробила та вдосконалила власний мультимодальний коносамент (проформа ФІАТА 1992 р.), що використовується і сьогодні [1]. На основі наявної практики, з урахуванням Гаазьких та Гаазько-Вісбійських правил, були також розроблені Правила ЮНКТАД/МТП для мультимодальних транспортних документів. Це свідчить про те, що еволюція правового регулювання в цій сфері відбувалася не лише шляхом створення обов'язкових міжнародних конвенцій, а й через розробку впливових недержавних правил, які сприяли гармонізації міжнародної торговельної практики [4].

Детальніший розгляд еволюції ключових міжнародних конвенцій дозволяє простежити поступове посилення відповідальності перевізника та розширення сфери правового регулювання. Основоположним актом у цій сфері стали Гаазькі правила 1924 р., що набрали чинності у 1931 р. Вони встановили базовий обов'язок перевізника забезпечити морехідний стан судна, його належне укомплектування та підготовку вантажних приміщень. Договір перевезення засвідчувався коносаментом, а відповідальність перевізника

будувалася на принципі презумпції вини, що змушувало його доводити відсутність своєї вини у випадку втрати чи пошкодження вантажу. Важливо, що положення про відповідальність носили імперативний характер, унеможливаючи їх зміну за згодою сторін, проте питання юрисдикції та арбітражу залишалися поза межами регулювання.

Подальший розвиток відбувся з прийняттям Правил Вісбі (Протокол 1968 р.), які розширили сферу дії Гаазьких правил та посилили межі відповідальності перевізника. Значно прогресивнішими стали Гамбурзькі правила 1978 р. Вони поширили свою дію на перевезення тварин, палубних та небезпечних вантажів, виключили звільнення від відповідальності за навігаційну помилку, збільшили до двох років строки позовної давності та розширили колізійні прив'язки для визначення юрисдикції, дозволивши її множинність.

Кульмінацією уніфікаційних зусиль стали Роттердамські правила 2008 р., розроблені з метою комплексного регулювання перевезень, включаючи мультимодальні етапи за принципом «від дверей до дверей». Дані правила встановлюють період відповідальності перевізника з моменту отримання вантажу до моменту його видачі. Вони зберігають принцип вини перевізника, проте містять розширений перелік підстав для звільнення від відповідальності, серед яких непереборна сила, військові дії, страйки, приховані дефекти вантажу тощо. Роттердамські правила також закріплюють дворічний строк позовної давності, принцип множинності юрисдикції та можливість укладення угод про «винятковий вибір суду» й арбітражних угод, маючи на меті замінити попередні конвенції [5]. Порівняльний аналіз Конвенцій щодо правил морських перевезень наведено в Табл.

Таблиця

Порівняльна характеристика Гаазько-Вісбійських, Гамбурзьких та Роттердамських правил морських перевезень вантажів [6-8]

Порівняльна характеристика	Гаазько-Вісбійські правила (1924/1968)	Гамбурзькі правила (1978)	Роттердамські правила (2008)
Сфера застосування	Перевезення вантажів морським шляхом від порту до порту (відповідальність за вантаж "від гака до гака").	Перевезення вантажів морським шляхом від порту до порту, а також включає наземну частину перевезення, якщо вона включена в єдиний договір перевезення.	Мультимодальні перевезення, включаючи морську, річкову, автомобільну та залізничну частини, якщо вони є частиною єдиного договору перевезення "Від дверей до дверей".

Продовження таблиці

Порівняльна характеристика	Гаазько-Вісбійські правила (1924/1968)	Гамбурзькі правила (1978)	Роттердамські правила (2008)
Відповідальність перевізника	Основою є принцип вини (fault-based liability) з низкою звільнень (навігаційна помилка, пожежа тощо).	Відповідальність на основі презумпції вини (presumption of fault) – Перевізник несе відповідальність, поки не надасть докази того, що він вжив усіх розумних запобіжних заходів. Обмежений перелік звільнень.	Відповідальність на основі презумпції вини, розширений перелік обставин, які можуть звільнити перевізника від відповідальності.
Період відповідальності	«Від гака до гака» - Від моменту прийняття вантажу на борт судна до його вивантаження.	З моменту отримання вантажу під опіку перевізника до моменту доставки вантажу одержувачу.	З моменту прийняття вантажу під опіку перевізника до моменту доставки вантажу одержувачу (фактично «від дверей до дверей»).
Обмеження відповідальності	Залежить від ваги вантажу (наприклад, 2 фунти стерлінгів за фунт ваги або 666,67 СДР за одиницю вантажу).	Вищі ліміти відповідальності, ніж у Гаазько-Вісбійських правилах (наприклад, 875 СДР за одиницю вантажу або 2,5 СДР за кілограм брутто ваги).	Найвищі ліміти відповідальності (наприклад, 875 СДР за одиницю вантажу або 3 СДР за кілограм брутто ваги).
Повідомлення про пошкодження/втрату	Специфічні вимоги до письмового повідомлення про пошкодження/втрату вантажу.	Більш гнучкі вимоги до повідомлення, але все ще передбачається письмове повідомлення.	Більш гнучкі вимоги до повідомлення, включаючи можливість електронних засобів.
Давність позову	1 рік з дати доставки вантажу або з дати, коли вантаж мав бути доставлений.	2 роки з дати доставки вантажу або з дати, коли вантаж мав бути доставлений.	2 роки з дати доставки вантажу або з дати, коли вантаж мав бути доставлений.
Коносамент	Регулюється як основний документ, що підтверджує договір перевезення.	Більш детально регулюється використання коносаментів.	Визнає електронні транспортні записи (electronic transport records) поряд з традиційними коносаменами.
Суб'єкти, на яких поширюється відповідальність	Перевізник.	Перевізник, а також його слуги та агенти, якщо вони діяли в межах своїх повноважень.	Перевізник, а також судноплавні та інші оператори, які фактично здійснюють перевезення (performing parties).
Електронні документи	Не згадуються.	Згадується можливість електронного підписання коносамента.	Присвячено окрему главу електронним транспортним записам.
Мета	Захист інтересів перевізників.	Спроба врівноважити інтереси вантажовласників та перевізників.	Модернізація та уніфікація міжнародного морського права, враховуючи розвиток технологій та мультимодальних перевезень.

Розглядаючи національне регулювання, важливо акцентувати на господарсько-правовому аспекті мультимодальних перевезень. З цієї точки зору, вони являють собою комплексний різновид господарської діяльності, метою якої є отримання прибутку. Для здійснення такої діяльності перевізник як суб'єкт господарювання повинен відповідати низці обов'язкових легалізаційних умов. До них належать державна

реєстрація, отримання ліцензії та інших документів дозвільного характеру як на саму діяльність, так і безпосередньо на морський транспорт, що підтверджують його безпечний технічний стан. Відносини між сторонами базуються на договорі мультимодального перевезення, який за своєю правовою природою є багатостороннім, оплатним, строковим, консенсуальним та майново-господарським, а всі його умови визнаються

істотними. Таким чином, на національному рівні правове регулювання фокусується не лише на правилах перевезення, а й на дозвільних та договірних засадах ведення відповідного бізнесу [1].

Україна не є договірною стороною ні Гаазьких правил 1924 року, ні Гамбурзьких правил 1978 року, ні Роттердаських правил 2008 року. Правове регулювання договірних відносин у сфері морських перевезень в Україні здійснюється відповідно до положень Кодексу торговельного мореплавства України 1995 року, норми якого в окремих аспектах наближені до положень Гаазьких правил [1, 9].

Практичні наслідки та ризики для організації мультимодальних перевезень

Переходячи від аналізу міжнародної нормативно-правової бази до національної, необхідно провести критичний аналіз основного нормативного акту – Закону України «Про мультимодальні перевезення вантажів», прийнятого в 2021 році. Його прийняття стало значним кроком вперед у галузі вантажних перевезень, проте він і створив потенціал для правових протиріч.

Згрупуємо та деталізуємо основні проблеми, що безпосередньо впливають на роботу транспортних операторів, вантажовласників та експедиторів, викликані правовими колізіями даного Закону:

1. Відповідальність за втрату або пошкодження вантажу визначається не на користь вантажовласника. Саме на нього покладається необхідність визначення на якому саме етапі (морському, автомобільному чи залізничному) відбулося пошкодження чи втрата вантажу.

2. Вантажовласник стикається із «Клаптиковою» відповідальністю перевізників. Адже на кожному етапі застосовуються різні ліміти відповідальності перевізників:

- Так за втрату чи пошкодження вантажу під час морського перевезення відповідальність перевізника коливається в межах 666,67 розрахункових одиниць (SDR) за місце або 2 SDR за 1 кг втраченого/пошкодженого вантажу. SDR (Special Drawing Rights) – спеціальні права запозичення МВФ (станом на 2025 р. $\approx 1 \text{ SDR} \approx 55\text{--}60 \text{ грн}$) [10].

- Згідно з національних та міжнародних норм права, якщо відбувається пошкодження або втрата вантажу під час транспортування залізницею, перевізник повинен компенсувати повну заявлену вартість вантажу [11, 12].

- За втрату чи пошкодження вантажу під час перевезення автомобільним транспортом відповідальність перевізника становить 8,33 SDR за 1 кг брутто ваги втраченого або пошкодженого вантажу [13, 14].

Отже впроваджена Законом мережева модель відповідальності на практиці створює для вантажовласника значний фінансовий ризик. Через різні ліміти відшкодування на морському (666,67 SDR за місце), автомобільному (8,33 SDR за кг) та залізничному (повна вартість) етапах розмір компенсації залежить не від реальної шкоди, а від технічної спроможності довести

місце пошкодження вантажу. Це ускладнює процес страхування та перетворює будь-який страховий випадок на складний і дорогий процес доказування, що на пряму збільшує операційні витрати бізнесу.

3. Морський етап перевезення регулюється Кодексом торговельного мореплавства України. Даний кодекс в свою чергу базується на застарілих Гаазько-Вістбійських правилах. На основі цього можна зробити висновок, що інтереси вантажовласника менш захищені. Причиною є те, що згідно цих застарілих норм перевізник звільняється від відповідальності за навігаційну помилку екіпажу. В сучасних міжнародних режимах цього вже не передбачено [10].

Тобто положення Кодексу торговельного мореплавства України, що звільняє перевізника від відповідальності за навігаційну помилку екіпажу, є критичним операційним ризиком для вантажовласника. З точки зору управління ланцюгом постачання ця архаїчна норма (відсутня в сучасних міжнародних режимах) означає, що вантаж може бути втрачено через пряму недбалість персоналу перевізника, але збитки не будуть компенсовані. Це робить морський етап перевезення в українській юрисдикції менш безпечним та прогнозованим порівняно з міжнародною практикою.

4. Ще одним із прикладів, котрі стосуються необхідності уніфікації норм Закону України «Про мультимодальні перевезення вантажів», є термін позовної давності. Так, слід зауважити, що даний закон в цьому питанні посилається на Цивільний кодекс України, Кодекс торговельного мореплавства України та інші українські кодекси. Згідно з вищеперерахованими нормативно-правовими актами, термін позовної давності за втрату чи пошкодження вантажу складає один рік. Проте країни, котрі ратифікували Гамбурзьку конвенцію (1978 року), в цьому питанні застосовують термін позовної давності строком два роки. Це створює потенційну правову колізію, якщо сторони перебувають у різних юрисдикціях, одна з яких є учасником Гамбурзьких правил, а інша – ні, або якщо сторони прямо погодили застосування цих правил у договорі. Тобто якщо одна зі сторін договору знаходиться в державі, яка є учасницею Гамбурзьких правил, а в договорі визначено їх застосування, може виникнути суперечність між 1-річним строком давності за Цивільним кодексом України або Кодексом торговельного мореплавства та 2-річним строком, передбаченим ст. 20 Гамбурзьких правил.

Для компанії, що працює з партнером із юрисдикції Гамбурзьких правил, це означає, що позов, поданий на 13-му місяці, буде визнано правомірним міжнародним арбітражем, але його виконання може бути заблоковане на території України. Це не лише юридична, а й репутаційна та комерційна проблема, що підриває довіру до українських контрагентів. Розбіжність між однорічним строком позовної давності за українським законодавством та дворічним строком за Гамбурзькими правилами створює управлінську невизначеність та ризик зриву міжнародних арбітражних розглядів.

Подібна ситуація також можлива у разі відсутності чіткого вибору права в договорі, коли застосовується право країни з тіснішим зв'язком до правовідносин, або під час вирішення спору в арбітражі, який базується на міжнародних нормах. Наслідком такої колізії може стати відмінне тлумачення строків давності у національних судах порівняно з міжнародними органами або арбітражем, що в окремих випадках може навіть вплинути на можливість визнання й виконання арбітражного рішення в Україні.

Тому поки не узгоджено питання із даними колізійними моментами, на практиці сторонам договору мультимодального перевезення варто чітко визначати право, котре застосовується, та обраний режим відповідальності, що дозволяє уникнути правових невизначеностей у разі спору. Зокрема, рекомендується прямо вказувати національну юрисдикцію (наприклад, право України). Також варто конкретизувати, які міжнародні правила застосовуються або виключаються (наприклад, Гамбурзькі, Гаазькі правила чи CMR). Слід уникати ситуацій, за яких різні етапи транспортування вантажів регулюються різними правовими системами, якщо сторони не готові до ускладненого механізму правового захисту. У випадках міжнародного спору необхідно зважати, що термін позовної давності може визначатися не лише національним законодавством, а й згідно норм іноземного або міжнародного права. Це відноситься особливо до випадків, коли спір розглядається поза межами України [10, 15].

5. Необхідність гармонізації вітчизняного законодавства із європейським вимагає і сфера цифровізації. Так згідно статей 4 та 5 Регламенту (ЄС) 2020/1056 Європейського Парламенту і Ради від 15 липня 2020 року «Про електронну інформацію про вантажні перевезення», європейське законодавство встановлює обов'язкову норму, котра зобов'язує компетентні органи держав-членів приймати інформацію про вантажні перевезення в електронному вигляді. Чинне законодавство України поки просто передбачає можливість використання електронного документу мультимодального перевезення. Імперативної норми щодо цього немає. Це стосується і електронного коносаменту.

Відсутність в українському законодавстві обов'язкової норми, котра зобов'язує приймати електронні транспортні документи, на відміну від Регламенту ЄС 2020/1056, призводить до технологічного відставання та логістичних збоїв. На практиці це означає, що вантаж, який супроводжується е-документом, може бути затриманий на кордоні або в порту через вимогу контролюючого органу надати паперову версію. Це гальмує швидкість обробки вантажів, збільшує витрати на друк та кур'єрську доставку і є прямим нетарифним бар'єром для інтеграції в європейський цифровий транспортний простір.

Тому в цьому сегменті наше законодавство поки потребує уніфікації із Європейським для успішної інтеграції у транспортний простір ЄС [16]. Проте, зважаючи на успіхи України у галузі цифровізації, є досить

чіткі можливості для втілення цього в реальність у найближчій перспективі.

Також хотілося б звернути увагу на ще одну проблему, котра стосується сучасних реалій повномасштабної війни. Як виявилось, сучасне законодавство України практично не має дієвих норм щодо регулювання мультимодальних перевезень в умовах надзвичайних ситуацій та воєнного стану. Так у законодавстві немає норм щодо регулювання розподілу відповідальності за пошкодження чи втрату вантажу внаслідок бойових дій. Тобто не деталізовано форс-мажорні обставини, котрі стосуються цього контексту. Також законодавством не регулюється питання страхування військових ризиків у мультимодальних ланцюгах постачання.

Відсутність у законодавстві чітких норм щодо розподілу відповідальності за втрату вантажу внаслідок бойових дій та страхування військових ризиків створює управлінський параліч для логістичних операторів. На практиці це змушує бізнес працювати «На свій страх і ризик», оскільки неможливо адекватно прорахувати вартість перевезення, закласти ризики в договір та отримати повне страхове покриття. Цей правовий вакуум напругу стримує вантажопотоки та робить український транспортний коридор значно дорожчим і ризикованішим для міжнародної торгівлі.

Отож, підводячи підсумки нашого комплексного аналізу, пропонуються наступні заходи щодо вдосконалення національного законодавства:

1. Змістити акцент на покращення захисту інтересів вантажовласника шляхом внесення змін до Закону України «Про мультимодальні перевезення вантажів». Основним результатом цього повинен бути поетапний перехід від мережевої до єдиної системи відповідальності оператора.

2. Внести зміни до Кодексу торговельного мореплавства України, щоб усунути звільнення перевізника від відповідальності за навігаційну помилку, що є критичним ризиком для вантажовласника.

3. Впровадити в національне законодавство імперативні норми, подібні до Регламенту (ЄС) 2020/1056, котрі змусять усі контролюючі органи та суб'єкти господарювання приймати та обробляти транспортні документи в електронному вигляді. Зазначимо, що законодавчо в Україні вже затверджено використання електронних товарно-транспортних накладних в автомобільних вантажних перевезеннях. Проте на сьогодні е-ТТН функціонує в експериментальному режимі. Повний обов'язковий перехід на електронні ТТН для всіх учасників ринку не відбувся через доопрацювання технічних рішень та адаптацію бізнесу до нових вимог. Було б раціонально запровадити цифрову форму документу для мультимодального перевезення [17].

4. Розробити доповнення до Закону України «Про мультимодальні перевезення вантажів», що регулюватиме особливості здійснення даних перевезень в умовах воєнного стану, визначатиме поняття форс-мажору, пов'язаного із воєнними діями, та координуватиме механізми страхування військових ризиків.

Каталізатором необхідності впровадження вище перерахованих заходів є зміна логістичних маршрутів України, котру спровокувала війна. Проблема правового регулювання даних альтернативних маршрутів є також недостатньо дослідженою. Хоча на перевезення через сухопутні «Шляхи солідарності» ЄС формально поширюється дія Закону України «Про мультимодальні перевезення вантажів», їх використання виявляє системні приховані колізії. Поєднання правових режимів різних країн у рамках «Шляхів солідарності» загострює недоліки діючої в Україні мережевої моделі відповідальності оператора. Це не аби як впливає на процес доведення та захисту інтересів вантажовласника. Отож в сукупності ці факти також підтверджують необхідність удосконалення чинного законодавства щодо викликів надзвичайних ситуацій.

Висновки

Проведене нами дослідження акцентує увагу на необхідності реформування системи правового регулювання мультимодальних перевезень на світовому та національному рівнях. Еволюція міжнародних конвенцій (від Гаазьких правил 1924 року до Роттердамських правил 2008 року) демонструє поступовий перехід від фрагментарного до комплексного регулювання на стадії всього періоду транспортування вантажів «Від дверей до дверей». Однак глобальної правової уніфікації в цьому полі досі не досягнуто через проходження ратифікаційних процесів. Варто підкреслити, що українське національне законодавство базується на застарілих Гаазько-Вістбійських принципах, що суттєво обмежує захист вітчизняних вантажовласників у міжнародній торгівлі. Проте, провівши комплексний аналіз, приходимо до висновку, що й поспішати із приєднанням до Роттердамських правил нашої державі теж не слід. Причиною є досить об'ємна робота над адаптацією всієї законодавчої бази під вимоги даної Конвенції. Тому, на наш погляд, варто зачекати, поки її ратифікує необхідна кількість країн для набрання нею чинності. Тільки після цього слід змінювати національне законодавство. Проте, на нашу думку, варто було б розглянути можливість часткової імплементації певних прогресивних норм цих правил. Зокрема щодо цифровізації та розширення періоду відповідальності. Це варто зробити навіть до набуття чинності Конвенції, щоб не відставати від міжнародної практики та покращувати конкурентоспроможність українських перевізників.

Критичний аналіз Закону України «Про мультимодальні перевезення вантажів» 2021 року виявив системні недоліки. Впроваджена ним мережева модель відповідальності оператора створює «клаптикову систему» компенсації, де остаточний розмір пошкодження залежить не від фактичної шкоди, а від технічної можливості локалізувати етап пошкодження вантажу. Зміна в умовах війни логістичних коридорів через порти країн ЄС створює правовий вакуум у сфері

форс-мажорних умов та страхування військових ризиків. Євроінтеграційні зобов'язання України вимагають гармонізації національного законодавства з Регламентом (ЄС) 2020/1056 щодо обов'язкової цифровізації транспортного документообігу.

Перелік використаних джерел

- [1] Добровольська В. В. Господарсько-правовий аспект змішаних (мультимодальних) морських перевезень. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Юридичні науки. 2023. № 34(73), № 3. С. 33-37. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnu-2707-0581/2023.3/06>.
- [2] Кириллова О. В. Теоретичні основи управління роботою флоту у транспортно-технологічних системах: дис.... д-ра техн. наук : 05.22.01. Одеса: ОНМУ, 2017. 470 с.
- [3] Кириллова О. В., Кириллова В. Ю. Мультимодальні перевезення у національному законодавстві та міжнародному контексті. *Розвиток транспорту*. 2024. № 3(22). С. 106-122. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.07>.
- [4] Картишев Д. В. Імплементація Україною світового досвіду інституційної підтримки вантажних перевезень. *Економічні інновації*. 2018. № 66. С. 87-95.
- [5] Радчук О.П. Колізійні питання міжнародних морських перевезень. *Порівняльно-аналітичне право*. 2015. № 4. С. 138-142.
- [6] Про уніфікацію певних правил про коносамент: Міжнародна конвенція Організації Об'єднаних націй від 25.08.1924 р. URL: <http://sin-glewindow.org/docs/120?lang=ukr> (дата звернення: 21.08.2025).
- [7] Про морське перевезення вантажів («Гамбурзькі правила»): Конвенція Організації Об'єднаних Націй від 31.03.1978 р. URL: https://uncitral.un.org/en/texts/transportgoods/conventions/hamburg_rules (дата звернення: 21.08.2025).
- [8] Про договори міжнародного перевезення вантажів повністю або частково морем («Роттердамські правила»): Конвенція Організації Об'єднаних Націй від 11.12.2008 р. URL: https://uncitral.un.org/en/texts/transportgoods/conventions/rotterdam_rules (дата звернення: 21.08.2025).
- [9] Кунда Н.Т. Міжнародні морські перевезення: аспекти правового регулювання. *Scientific Collection «InterConf»*. 2022. № 121. С. 325-336. DOI: <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.08.2022.031>.
- [10] Кодекс торговельного мореплавства України : Кодекс України від 23.05.1995. № 176/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-vp#Text> (дата звернення: 21.08.2025).
- [11] Про затвердження Статуту залізниць України: постановою Кабінету Міністрів України від

- 06.04.1998. № 457-98-п. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/457-98-p#Text> (дата звернення: 21.08.2025).
- [12] Про міжнародне залізничне вантажне сполучення (УМБС): Угода від 01.11.1951. URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/140818_529207 (дата звернення: 21.08.2025).
- [13] Конвенція про договір міжнародного автомобільного перевезення вантажів (КДПВ): Конвенція Організації Об'єднаних Націй від 19.05.1956. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_234#Text (дата звернення: 21.08.2025).
- [14] Протокол до Конвенції CMR №19487 від 05.07.1978 р. URL: <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201208/volume-1208-I-19487-English.pdf> (дата звернення: 21.08.2025).
- [15] Цивільний кодекс України: Кодекс України від 16.01.2003 № 435-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text> (дата звернення: 21.08.2025).
- [16] Про електронну інформацію про вантажні перевезення (текст з відповідністю ЄЕЗ): Регламент (ЄС) 2020/1056 від 15.07.2020. № 32020R1056. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/1056/oj/eng> (дата звернення: 21.08.2025).
- [17] Про затвердження Порядку функціонування системи електронного документообігу електронна товарно-транспортна накладна: Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27.12.2024. № 1491. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0259-25#Text> (дата звернення: 21.08.2025).

LEGAL CONFLICTS IN THE PRACTICE OF ORGANIZING MULTIMODAL TRANSPORT INVOLVING SEA CARRIAGE: RISKS AND MANAGERIAL CONSEQUENCES IN EMERGENCY SITUATIONS

- Ibrahim A.M.** postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6007-5708>, e-mail: arturibrahim97@gmail.com;
- Klevtsov K.M.** D.Sc. (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8486-1104>, e-mail: klevtsovki@i.ua

The article analyzes the key organizational problems and managerial risks arising in the practice of multimodal transportation involving sea transport due to the fragmentation of international and national legislation. It explores how legal conflicts affect the efficiency of logistics chains, especially in emergency situations. The aim of this work is to identify systemic shortcomings in the legal field and develop practical recommendations to minimize their negative impact on the transportation process. The research methodology combines a comparative analysis of key international conventions and the Law of Ukraine «On Multimodal Transportation of Goods» with a systemic approach to assessing their consequences for transport operators and cargo owners. It has been established that the network liability model implemented in Ukraine creates a «patchwork» compensation system in practice, which generates significant financial and operational risks for market participants, complicating insurance and claims settlement processes. The practical consequences of such conflicts are analyzed, such as the preservation of the archaic norm on the carrier's exemption from liability for navigational error, which reduces the reliability of the sea leg of the transport, and the discrepancy in the statutes of limitation. Special attention is paid to the impact of the legal vacuum in the regulation of transportation under martial law, which creates managerial paralysis in matters of military risk insurance. It is substantiated that the absence of an imperative norm for the digitalization of document flow, unlike in EU law, creates non-tariff barriers and slows down integration into the European transport space. The scientific novelty lies in the development of proposals aimed at improving the managerial and organizational aspects of transportation by reforming the legal framework. Specific steps are proposed for the harmonization of legislation, which will increase the predictability, safety, and efficiency of multimodal supply chains.

Keywords: multimodal transport, maritime transport, transport law, operator's liability, legal conflicts.

References

- [1] V. Dobrovolska, "Hospodarsko-pravovyi aspekt zmishanykh (multymodalnykh) morskyykh perevezen" ["Economic and legal aspect of mixed (multimodal) sea transportation"], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: yurydychni nauky – Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University*.
- [2] O. V. Kyryllova, "Teoretychni osnovy upravlinnia robotoiu flotu u transportno-tekhnologichnykh systemakh" ["Theoretical bases of fleet operation management in transport-technological systems"], DSc. thesis, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine, 2017. (Ukr.)

Series: Juridical Sciences, № 3, pp. 33-37, 2023. doi: [10.32782/tnu-2707-0581/2023.3/06](https://doi.org/10.32782/tnu-2707-0581/2023.3/06). (Ukr.)

- [3] O. Kyrylova, V. Kyrylova, "Multimodalni perevezennia u natsionalnomu zakonodavstvi ta mizhnarodnomu konteksti" ["Multimodal transport in national legislation and international context"], *Rozvytok transport – Transport Development*, № 3(22), pp. 106-122. doi:10.33082/td.2024.3-22.07. (Ukr.)
- [4] D. Kartyshev, "Implementatsiia Ukrainoiu svitovoho dosvidu instytutsiinoi pidtrymky vantazhnykh perevezen" ["Implementation of ukraine's global institutional framework for freight transport"], *Ekonomichni innovatsii – Economic Innovations*, № 66, pp. 87-95, 2018. (Ukr.)
- [5] O. Radchuk, "Koliziini pytannia mizhnarodnykh morskyykh perevezen" ["Collision issues of international sea transportation"], *Porivnialno-analitychne parvo – Comparative Analytical Law*, № 4, pp. 138-142, 2015. (Ukr.)
- [6] United Nations. (Aug. 25, 1924). *International Convention for the Unification of Certain Rules of Law relating to Bills of Lading (The «Hague Rules»)*. [Online]. Available: <http://singlewindow.org/docs/120?lang=ukr>. Accessed on: August 21, 2025.
- [7] United Nations. (Mar. 31, 1978). *Convention on the Carriage of Goods by Sea (the «Hamburg Rules»)*. [Online]. Available: https://uncitral.un.org/en/texts/transportgoods/conventions/hamburg_rules. Accessed on: August 21, 2025.
- [8] United Nations. (Dec. 11, 2008). *Convention on Contracts for the International Carriage of Goods Wholly or Partly by Sea (the «Rotterdam Rules»)*. [Online]. Available: https://uncitral.un.org/en/texts/transportgoods/conventions/rotterdam_rules. Accessed on: August 21, 2025.
- [9] N. Kunda, "Mizhnarodni morski perevezennia: aspekty pravovoho rehuliuвання" ["International maritime transportation: Aspects of legal regulation"], *Scientific Collection «InterConf»*, № 121, pp. 325-336, 2022. doi: 10.51582/interconf.19-20.08.2022.031 (Ukr.)
- [10] Ukraine, Verkhovna Rada of Ukraine. (May 23, 1995) *Kodeks torhovelnoho moreplavstva Ukrainy* [Merchant Shipping Code of Ukraine], Law of Ukraine №176/95-BP. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-vp#Text>. Accessed on: August 21, 2025.
- [11] Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine. (Apr. 6, 1998). *Pro zatverdzhennia Statutu zaliznyts Ukrainy* [On the Approval of the Charter of the Railways of Ukraine], Resolution №457-98-п. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/457-98-п#Text>. Accessed on: August 21, 2025.
- [12] Uhoda vid 01.11.1951. *Uhoda pro mizhnarodne zaliznychne vantazhne spoluchennia (UMVS)* [On International Goods Transport by Rail]. [Online]. Available: https://zakononline.com.ua/documents/show/140818_529207. Accessed on: August 21, 2025.
- [13] United Nations. (May 19, 1956). *Convention on the Contract for the International Carriage of Goods by Road (CMR)*. [Online]. Available: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_234#Text. Accessed on: August 21, 2025.
- [14] United Nations. (Jul. 5, 1978). *Protocol to the Convention on the Contract for the International Carriage of Goods by Road (CMR)*. №19487. [Online]. Available: <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201208/volume-1208-I-19487-English.pdf>. Accessed on: August 21, 2025.
- [15] Ukraine, Verkhovna Rada of Ukraine. (Jan. 16, 2003). *Tsyvilnyi kodeks Ukrainy* [The Civil Code of Ukraine], Law of Ukraine №435-IV. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text>. Accessed on: August 21, 2025.
- [16] European Parliament and the Council. (Jul. 15, 2020). *Regulation (EU) 2020/1056 of the European Parliament and of the Council of 15.07.2020 on electronic freight transport information (Text with EEA relevance)*. Document 32020R1056. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/1056/oj/eng>. Accessed on: August 21, 2025.
- [17] Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (Dec. 27, 2024). *Pro zatverdzhennia Poriadku funktsionuvannia systemy elektronnoho dokumentoobihu elektronna tovarno-transportna nakladna* [On the Approval of the Procedure for the Functioning of the Electronic Waybill System]. Order № 1491. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0259-25#Text>. Accessed on: August 21, 2025.

Стаття надійшла 21.08.2025

Стаття прийнята 15.09.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Ібрагім А. М., Клевцов К. М. Правові колізії в практиці організації мультимодальних перевезень за участю морського транспорту: ризики та управлінські наслідки в умовах надзвичайних ситуацій. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 340-349. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344989>.

РАЗОМ – ЗНАЧИТЬ СИЛЬНІШІ

В нарисі наведені відомості щодо етапів становлення, розвитку та досягнень двох старіших кафедр ДВНЗ «ПДТУ» – кафедри теорії металургійних процесів та ливарного виробництва – за період від 1944 року до їх об'єднання в 2014 році.

16 вересня 2014 року наказом ректора ПДТУ №124-05 на базі двох старіших кафедр Вишу – теорії металургійних процесів та технології і комп'ютеризації ливарного виробництва - була створена кафедра теорії металургійних процесів – ливарного виробництва. Цій події передувала насичена та яскрава 70-ти річна історія обох кафедр.

Після звільнення м. Маріуполя від німецьких загартбників основне завдання металургів полягало в якнайшвидшому запуску зруйнованих війною підприємств, створенні нових, більш потужних і продуктивних агрегатів та прогресивних технологічних процесів. Для вирішення поставлених завдань були потрібні фахівці-металурги високої кваліфікації, і в 1944 році в Маріупольському металургійному інституті була створена кафедра «Теорія металургійних процесів».

Брати участь у підготовці фахівців-металургів кафедра теорії металургійних процесів почала з моменту заснування як загальноінженерна кафедра. Викладачі кафедри читали загальнометалургійні дисципліни «Фізична хімія», «Кристалогія і мінералогія», «Теорія металургійних процесів» і «Загальна металургія». Для виконання лабораторних робіт були організовані лабораторії фізичної хімії, теорії металургійних процесів і загальної металургії.

У зв'язку з потребою металургійної промисловості та науково-дослідних інститутів у кваліфікованих кадрах інженерів-дослідників, з урахуванням високої педагогічної та наукової кваліфікації викладачів кафедри ТМП, з вересня 1965 року на кафедрі була організована підготовка фахівців за спеціальністю «Фізико-хімічні дослідження металургійних процесів».

Першим завідувачем кафедри «Теорія металургійних процесів» з 1944 по 1974 рік був кандидат технічних наук доцент Скобло С.Я. - випускник Дніпропетровського металургійного інституту, який з 1949 р. по 1959 р. був також деканом металургійного факультету, а з 1959 по 1964 рік проректором Жданівського металургійного інституту з наукової роботи. Пізніше кафедру очолювали Є.О. Казачков, Л.І. Тарасюк.

Великі зусилля та ініціативу щодо відкриття та організації навчання за новою спеціалізацією проявили С.Я. Скобло та Є.О. Казачков за підтримки доцентів Ю.І. Кирюшкіна та В.Г. Страхова. У 1965 році кафедру поповнили: канд. техн. наук О.М. Скребцов, який до

того працював у радіоізотопній лабораторії ЦЗЛ заводу «Азовсталь», та випускник Жданівського металургійного інституту А.В. Остроушко. Особлива роль в організації оснащення кафедри новою апаратурою та вимірювальною технікою належить Е.О. Казачкову та завідувачам лабораторією Н.Ф.Сапелкіну і Г. М. Рижкову, а також навчальним майстрам Г.А. Ткаченку і Т.А. Кроту.

У сімдесятих - вісімдесятих роках на кафедрі прийшли молоді випускники рідного ВНЗ: Шибанов В.І., Хрикін Б.М., Тарасюк Л.І., Мосюра Л.І., Мосюра Б.М., Мартинов С.А., Кужельна Л.І., Ісаєв О.Б. та після захисту дисертації доктора наук В.Н.Гладкий, В.О.Маслов, Л.Ю.Назюта, П.С.Харлашин та інші.



Співробітники кафедри ТМП (фото середини 70-х років). Зліва направо: С.Г. Мельнік, С.О. Мартинов, В.І. Шибанов, Г.М. Рижков, О.М. Скребцов, Є.О. Казачков, Н.І. Ревтов

З перших днів на кафедрі були встановлені найвищі стандарти дидактичної та наукової діяльності. В різні роки для обміну досвідом впровадження навчально-методичної роботи та читання циклу лекцій на кафедрі ТМП запрошувалися провідні професори з різних інститутів та університетів: проф. Ростовцев С.Т., проф. Жуховицький А.А., проф. Філіппов С.І., проф. Аверін В.В., проф. Арсент'єв П.П. Досвідом навчальної та методичної роботи з колегами з ЖДМІ ділився академик НАН України професор М.І. Гасик (НМетАУ). Кафедра теорії металургійних процесів завжди підтримувала тісні контакти з спорідненими кафедрами таких провідних вищих навчальних закладів, як НМетАУ, ДНТУ, НТУ України «КП».



Лекцію читає видатний вчений в галузі фізичної хімії, професор А.А. Жуховіцький (зліва) - 1974 р.

В свою чергу викладачі кафедри ТМП охоче ділилися своїми знаннями та досвідом під час зарубіжних відряджень. З грудня 1961 по грудень 1963 року доц. Казачков Є.О. був відряджений Мінвузом до Індії для читання лекцій та проведення навчальних занять в Індійському технологічному інституті (м. Кхарагпур). З жовтня 1972 р. по червень 1975 р. доцент Страхов В.Г. працював викладачем в Ель-Таббінському металургійному інституті (м. Каір). З березня 1974 р. по липень 1977 р. старший науковий співробітник Тарасюк Л.І. під час відрядження до Алжирської Народної Демократичної Республіки викладав в Аннабінському технічному університеті (м. Аннаба). З жовтня 1975 р. по червень 1978 р. професор Казачков Є.О. був відряджений Мінвузом до Єгипту для роботи на посаді завідувача кафедри чорної та кольорової металургії Ель-Таббінського металургійного інституту (м. Каір).



Захист курсового проекту в Ель-Таббінському металургійному інституті проводить професор Є.О. Казачков

Неможливо обійти мовчанням великий науковий доробок співробітників кафедри ТМП. Наукові дослідження були розпочаті в 40-і роки роботами її першого завідувача С.Я. Скоблє. У 1955-1960 рр. на кафедрі сформувався основний науковий напрямок «Теорія і практика підвищення якості сталі». В цьому напрямку

проводилися науково-дослідні роботи з вивчення процесів затвердіння і формування неоднорідності великих сталевих злитків.

В різні роки співробітниками кафедри також проводилися дослідження фізико-хімічних процесів окислення домішок у сталеплавильній ванні, активності кисню в сталі, закономірностей поведінки кисню в сталеплавильній ванні при випуску і розливанні сталі; спрямовані на підвищення якості товстого листа, що отримується з великих листових злитків спокійної та напівспокійної сталі; з розробки конструкцій сталевих виливниць для розливання якісної сталі; в галузі електрометалургії (спільно з в/о «Азовмаш» та інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона). Фахівці – металурги з великою шаною та повагою промовляють прізвища С.Я. Скоблє, Є.О. Казачкова, О.М. Скребцова, В.Г. Страхова та всіх тих, хто працював разом з ними.

Кафедра ливарного виробництва в Ждановському металургійному інституті була відкрита в 1944 році наказом ГУЧЗ Наркомтанкпрома СРСР № 17 від 5 квітня 1944 року. Т.в.о. завідувача кафедри був затверджений директор Ждановського металургійного інституту доцент Т.М. Смирнов. Кафедра ливарного виробництва призначалася для викладання загального курсу «Ливарне виробництво» для металургійних і технологічних спеціальностей. Від вересня 1953 року на посаду завідувача кафедри ливарного виробництва був призначений Распопов Іван Васильович, один з винахідників офлюсованого агломерату, що зазначено у Великій Енциклопедії.

У зв'язку з гострою нестачею фахівців – ливарників за наказом Мінвузу УРСР № 206 від 5 вересня 1955 року в ЖДМІ розпочалася підготовка інженерів-металургів за спеціальністю 0404 - «Ливарне виробництво чорних і кольорових металів». Так співпало, що в цьому ж році на кафедру прийшов молодий кандидат технічних наук, фронтник з великим виробничим досвідом Большаков Леонід Андрійович, вихованець відомих вчених-ливарників Н.П. Аксьонова та Л.І. Фанталова. В 1964 році він очолив кафедру, якою керував аж до 1975 року. Як показало життя, він був хорошим організатором, талановитим викладачем і вченим. В ці роки до колективу кафедри приходять професор Скребцов О.М., доценти Брагін І.І., Пліс С.І., Щегловітов Л.О., Сафаров Р.Ш., Гречаний А.П., Бичков Ю.Б., ст. викладач Ординцев С.К., асистенти Горлач А.А., Царіцина Н.В., Чоповський А.Г., навчальний майстер Бесчасний Б.С. та ст. лаборант Малакуцко В.В. Наприкінці 90-х – початку 2000-х до складу колективу кафедри увійшли доценти Л.О. Дан, Л.О. Трофімова, асистент Шахтарова С.М., завідувачий лабораторією М.М. Сосновцев та інші.

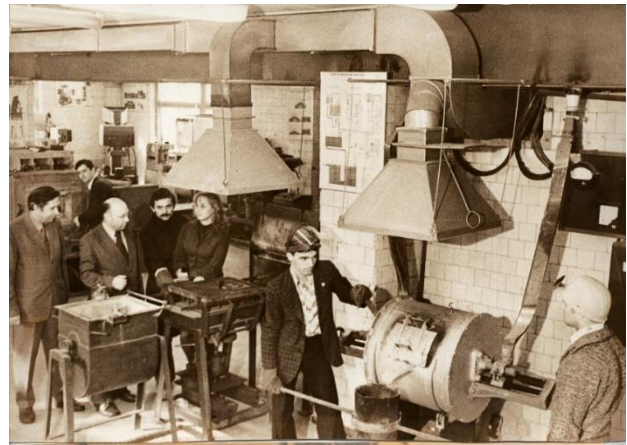
За роки свого існування кафедра мала унікальний кадровий склад. До нього входив і винахідник офлюсованого агломерату Распопов І. В. і розробник технології відливання башти танку Т-34 та винахідник

принципово нової броньової сталі Брагін І.І. і піонер застосування радіоізотопів в металургії Скребцов О.М. і почесний ливарник НРБ Сафаров Р.Ш. і Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки Троцан А.І.

Високоякісному професорсько-викладацькому складу кафедри відповідали досягнення студентів-ливарників під час навчання та після закінчення інституту. Під керівництвом доцента Большакова Л.А. студентська команда ливарників неодноразово ставала переможницею олімпіади за фахом в межах СРСР та України. Так у 1981 р. студент С.П. Тоболенько посів 1-е місце, в 1991 р. – студентка Н.Г. Бублик також посіла 1-е місце, а В.В. Левченко – 3-є місце серед 20 вищих навчальних закладів країни; А.А. Прокопов 1992 р. – 1-е місце, О.О. Секачов 1993 р. – 1-е місце, Д.І. Петренко 1998 р. – 1-е місце. У 2013 р. інженер конвертерного цеху комбінату «Азовсталь» групи «Метінвест», випускник кафедри 2008 р. Гаврилін Олександр, був визнаний одним із переможців Міжнародного конкурсу на приз Всесвітньої асоціації виробників сталі (World Steel Association). Нам є чим пишатися. На підприємствах міста, області, в країнах ближнього і далекого зарубіжжя, в органах самоврядування, в сфері малого, середнього та великого бізнесу працювали та продовжують працювати наші випускники. Ось лише деякі з них: Фарук Усман Сіддікі - директор Руставського металургійного заводу («Rustavi Steel» LLC) (Грузія), Сафаров В.Р. - Начальник відділу закупівель «Rustavi Steel» LLC (Грузія), Ларіонов А.А. - заступник головного інженера з конвертерного виробництва - начальник конвертерного цеху ПАТ «ММК ім. Ілліча» гр. «Метінвест», НІКОЛЕНКО Р.Н. - в.о. начальника ливарного цеху №1 ТОВ МРМЗ гр. «Метінвест», Сушков Н.А. – заступник директора ТОВ «Allcore-Ukraine» LTD, Кафтанатий А.Г. – головний металург ТОВ «СРЗ», м. Маріуполь, Неміч А.Г. – міський голова м. Гуляй-Поле, Концелідзе Т. – міністр екології Республіки Грузія.

Нам також пощастило з керівниками кафедри. Ми вже зазначали, що першим завідувачем кафедри був Распопов І. В., естафету в нього прийняв Большаков Л.А. В період з 1975 по 1990 рр. кафедру очолював Скребцов О.М.; з 1990 по 2001 – Сафаров Р.Ш. Наприкінці 2001 р. на посаду завідувача кафедри ливарного виробництва за сумісництвом був запрошений Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки доктор технічних наук, професор Троцан Анатолій Іванович - завідувач відділу матеріалознавства сталі Інституту проблем матеріалознавства іменем І.М. Францевича НАН України. Завдяки їх наполегливості та організаційному таланту кафедра розвивалася і матеріально і інтелектуально. Завдяки ним на кошти, отримані від впровадження наукових розробок кафедри, побудовано господарським способом та оснащено навчальну лабораторію ливарного виробництва в окремій двоповерховій будівлі, яка свого часу була однією з

найкращих в Україні. Студенти в цій лабораторії вивчали процеси лиття металів на реальних виробничих матеріалах і рідких сплавах.



Лабораторія ливарного виробництва. Кінець 70-х.
Викладачі – професор О.М. Скребцов, доцент Л.О. Щегловітов; навч. майстер В.Х. Кіриленко; студенти



2000 р. Засідання кафедри ливарного виробництва проводить завідуючий доцент Р.Ш. Сафаров. Перший ряд зліва – доцент Л.А. Большаков, справа – доцент Б.С. Бесчасний; другий ряд: зліва – доцент Л.О. Щегловітов, по середині – асистент С.М. Шахтарова, справа – навчальний майстер – М.О. Юрченко; третій ряд: зліва – зав. лабораторією А.А. Прокопов, посередині – доцент Б.О. Павлюк, справа – асистент Л.О. Трофімова

Висококваліфікований склад кафедри ливарного виробництва, науковий та практичний авторитет її викладачів привернув увагу міністерства вищої освіти України та іноземних амбасад. Кафедрі було доручено великомасштабну підготовку іноземних студентів. За весь період діяльності кафедри на ній підготовлено 66 інженерів-металургів з ливарного виробництва з 17 країн: Алжир – 6; Ангола -2; Афганістан – 18; Венесуела - 2; Німеччина /колишня НДР/ - 3; Гана - 1; Домініканська республіка – 3; Куба - 3; Йорданія - 1; Мадагаскар - 1; Нігерія - 7; Пакистан -10; Сенегал - 1; Сирія - 1; Танзанія - 5; Уганда - 1; Еквадор - 1.



Студенти з різних країн після захисту дипломних проектів з членами ДЕК. 1983 р. Члени ДЕК (зліва направо): доцент Л.А. Большаков, доцент Р.Ш. Сафаров, доцент Б.С. Бесчасний, професор О.М. Скребцов, головний металург ЖЗТМ Л.М. Фещенко, доцент Л.О. Щегловітов, ст. викладач О.О. Ликін, доцент І.І. Брагін

З перших днів існування на кафедрі сформувалися два основні напрямки наукової діяльності. Перший був пов'язаний з дослідженнями властивостей рідкого та твердого металу; другий – з розробкою принципово нових класів формувальних і стрижневих сумішей та процесами формування.

Під керівництвом Л.А. Большакова виконані фундаментальні дослідження ливарних і експлуатаційних напружень у виливницях, а також у великих зливках, розроблені оптимальні конструкції термоурівноважених виливниць, досліджені реологічні та технологічні властивості рідких, пластичних і сипучих легковибиваємих формувальних сумішей і впроваджено ливарне обладнання для їх приготування.

Всесвітньовідомі праці професора Скребцова О.М. присвячені застосуванню радіоізотопів при вивченні металургійних процесів. У 1963 р. він опублікував у видавництві «Металургія» одну з перших в світі монографій з використання радіоактивних ізотопів у металургійних дослідженнях. У 1965 р. вона була перевидана в Лондоні англійською мовою. Можна впевнено сказати, що Скребцов О.М. був засновником на кафедрі наукової школи з вивчення властивостей металевих розплавів, зокрема теорії кластерів.

Багато часу Р.Ш. Сафаров присвятив вивченню процесів модифікування чавуну. Свої дослідження і впровадження їх результатів в виробництво він здійснював не тільки в рідному інституті, а і під час закордонних відряджень. Так, в Болгарії в 1982 р. в м. Іхтіман на чавуноливарному комбінаті, він працював за контрактом старшим інженером-технологом з розробки технології виробництва прокатних валків.

Нарис підготували канд. техн. наук, доцент Дан Л.О., канд. техн. наук, доцент Тарасюк Л.І. При підготовці нарису були використані матеріали, люб'язно надані співробітниками та випускниками кафедри ТМПіЛВ ДВНЗ «ПДТУ»

Наукова діяльність Троцана А.І. пов'язана з розробкою наукових принципів і нових ефективно діючих, ресурсозберігаючих екологічно чистих технологій отримання якісних сталей на основі управління хімічною та структурною неоднорідністю. Приймав участь в розробці спеціальних методик дослідження стану меж зерен, локальної хімічної неоднорідності та механічних властивостей в осевій зоні безперервнолитивного металу. За його участю розроблено наукові та технологічні основи обробки чавуну і сталі порошковими дротами з ЛЗМ, РЗМ і карбонітридоутворюючими елементами, впровадження яких дозволило отримати багатомільйонний економічний ефект на ММК ім. Ілліча і МК «АЗОВСТАЛЬ».

Підсумовуючи, слід підкреслити, що всього за роки існування, на кінець 2014 р. загальна кількість інженерів, спеціалістів, магістрів, що були випускниками кафедри ливарного виробництва перевищила 2400.



2004 р. Святкування 60-річного ювілею кафедри

Час не має жалю і більшості тих, про кого ми розповідали вже немає з нами. Немає фізично, але є безліч фахівців-металургів в різних країнах і на різних континентах, які навчалися в них або за їх підручниками та несуть в собі частку їх знань та натхнення, сотні металургійних агрегатів, що були запроектовані та збудовані за їх обчисленнями, є мільйони тон металу, що були виплавлені та відлиті за технологією, розробленою ними.

Мине час війни. Україна почне відновлюватися. Їй будуть потрібні люди, які зможуть перетворити метал, опалений війною на каркаси нових будівель, на рейки залізниці, каструлі, дитячі візочки та безліч інших корисних та мирних речей. Фахівці-металурги. Маємо надію, що зможемо зробити свій внесок до справи підготовки таких фахівців. Разом. Бо разом ми сильні.